

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ
З ТЕОРЕТИЧНИХ ОСНОВ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ
Частина II

Київ

2016

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ
З ТЕОРЕТИЧНИХ ОСНОВ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ**

Частина II

*Ухвалено Методичною радою факультету
електроенерготехніки та автоматики
(протокол №10 від 30.05.2016 р.)*

Київ

2016

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з теоретичних основ електротехніки (Частина II) [Електронний ресурс]: для студентів електроенергетичного та електротехнічного профілів всіх форм навчання. / НТУУ «КПІ»; уклад.: М.Я. Островерхов, В.С. Бойко, І.А. Курило, Є.А. Кудря, А.А. Шуляк, М.А. Щерба, О.В. Петрученко, В.Ю. Лободзинський, Н.В. Трофімова – Київ: НТУУ «КПІ», 2016. - с. 120.

Навчальне видання

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

ДО ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

З ТЕОРЕТИЧНИХ ОСНОВ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ

Частина II

Укладачі: *Бойко Валерій Степанович, доктор тех. наук, проф.*
Курило Ігор Анатолійович, канд. техн. наук, проф.
Кудря Євген Антонович, канд. техн. наук, доц.
Шуляк Анатолій Антонович, стар.викл.
Щерба Максим Анатолійович, канд. техн. наук, стар.викл.
Петрученко Олег Васильович, стар.викл.
Лободзинський Вадим Юрійович, ас.
Трофімова Наталія Володимирівна, ас.

Відповідальний редактор *Бойко Валерій Степанович, доктор тех. наук, проф.*

ЗМІСТ

Правила та рекомендації щодо виконання робіт в лабораторіях
кафедри теоретичної електротехніки

Лабораторна робота №31

*Дослідження Трифазного електричного кола при з'єднанні джерела і
приймача зіркою*

Лабораторна робота №32

*Дослідження трифазного електричного кола при з'єднанні приймача
трикутником*

Лабораторна робота №33

Дослідження пасивного чотириполюсника змінного струму

Лабораторна робота № 34.

*Дослідження перехідних процесів в електричних колах з послідовним
з'єднанням елементів*

Лабораторна робота № 35

Дослідження симетричних складових трифазної системи напруг

Лабораторна робота № 41

Дослідження котушки з феромагнітним осердям

Лабораторна робота № 42

Ферорезонанс напруг

Лабораторна робота № 43

Ферорезонанс струмів

Лабораторна робота № 44

*Дослідження однофазного трансформатора з феромагнітним
осердям*

Лабораторна робота № 45

Дослідження однофазного феромагнітного підсилювача

Список рекомендованої літератури

ПРАВИЛА ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ВИКОНАННЯ РОБІТ в лабораторіях кафедри теоретичної електротехніки

Виконання лабораторних робіт допомагає студентам засвоїти теоретичний матеріал та оволодіти методикою експериментальних досліджень явищ в електричних колах, здійснити експериментальну перевірку основних законів та теорем теорії електричних кіл, набуті практичні навички роботи з лабораторним устаткуванням, обладнанням, вимірювальною апаратурою, обчислювальною технікою.

Спеціалізовані лабораторії кафедри теоретичної електротехніки НТУУ «КПІ» оснащені навчально-дослідними лабораторними стендами «Практика». Для виконання лабораторних робіт студентська група поділяється на бригади по три-чотири особи, але не менше двох згідно з правилами безпеки. За кожною бригадою закріплюється робоче місце на увесь час лабораторного практикуму.

Лабораторні роботи виконуються фронтальним методом згідно до робочого навчального плану студентських груп. Підготовка кожного студента до лабораторної роботи передбачає:

1) Ознайомлення з порядком виконання запланованої лабораторної та теоретичним матеріалом за темою роботи. Для цього потрібно скористатися «Методичними вказівками», які наявні у друкованому вигляді та у вигляді електронних документів на сайті кафедри. З друкованими примірниками «Методичних вказівок», які отримані в лабораторії кафедри, слід поводитись охайно, не робити в них ніяких записів і поміток, вчасно повертати до бібліотеки лабораторії. «Методичні вказівки» надають інформацію не тільки щодо робочого завдання, але і стислі теоретичні відомості за темою роботи. Якісна підготовка до наступного лабораторного заняття передбачає також самостійну роботу студентів над окремими розділами підручників, зазначених в «Методичних вказівках»;

2) Написання бланка звітного протоколу встановленого зразка, в якому мають бути: а) титульний лист, де зазначається повна назва лабораторної роботи, прізвище та ініціали студента, назва факультету і групи, прізвище та ініціали викладача-керівника лабораторних занять; б) мета роботи; в) робоче завдання з накресленими олівцем у відповідності з стандартом схеми, таблиці для запису результатів дослідів і розрахунків; г) основні теоретичні положення та розрахункові формули, які використовуються при виконанні робочого завдання;

3) Надання відповідей на запитання, які пропонуються в «Методичних вказівках», для зосередження на темі роботи.

На лабораторне заняття студент повинен прийти зі складеним протоколом звіту з лабораторної роботи та продуманими відповідями на контрольні запитання. На початку заняття викладач визначає рівень готовності кожного студента. Студент, не підготовлений до виконання лабораторної роботи, не допускається до виконання досліджень.

Під час виконання лабораторної роботи студенти виконують робоче завдання: збирають схеми, здійснюють вимірювання електричних величин, заносять дослідні дані у відповідні таблиці, перевіряють розрахункові співвідношення, зарисовують осцилограми. Тільки після схвалення викладачем одержаних результатів студенти мають право розбирати електричне коло, яке досліджували, та складати інше. Наприкінці заняття викладач візує усі екземпляри лабораторних звітів, що свідчить про виконання кожним студентом експериментальної частини лабораторної роботи.

Вдома студент має здійснити обробку результатів експериментів та продумати відповіді на питання для самостійної роботи. На наступному лабораторному занятті студент зобов'язаний подати викладачу до захисту повністю оформлений звіт попередньої лабораторної роботи та пред'явити підготовлений протокол для виконання чергової роботи. Студент, який не оформив або не захистив дві лабораторні роботи, відсторонюється від наступного лабораторного заняття. Його участь у подальших лабораторних заняттях можлива лише за умови ліквідації заборгованості.

На першому занятті викладач проводить інструктаж з техніки безпеки виконання лабораторних робіт в лабораторіях кафедри та показує робочі місця студентських бригад: надає інформацію щодо побудови навчально-дослідних стендів та правил користування вимірювальними приладами.

ОСНОВНІ ПРАВИЛА ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ

1. При виконанні робіт на електротехнічних пристроях слід неухильно дотримуватись правил техніки безпеки, оскільки електрична напруга від 36 (В) є небезпечною для життя людини.

2. Заборонено виконувати дослідження на робочому місці поодиночі.

3. Електричне коло дозволяється складати лише за умови відсутності напруги на вихідних затискачах джерел живлення, що забезпечується відповідним положенням вимикачів активних блоків навчально-дослідного лабораторного стенду та загальним вимикачем розподільчого щита лабораторії. Це правило стосується і випадків, коли під час дослідів виникає потреба будь-яких змін в електричному колі, що досліджується (закріпити провідник, замінити вимірювальний прилад, приєднати додаткове джерело живлення, змінити характер навантаження та інші).

4. Без дозволу викладача студентам забороняється вмикати джерела живлення і подавати напругу на складене ними електричне коло.

5. Увімкнення та вимкнення електричного кола слід здійснювати однією рукою. Інша рука при цьому не повинна торкатися елементів електричного кола. Бажано, щоб обличчя особи, яка виконує комутаційні операції, знаходилось якомога далі від комутаційної апаратури.

6. Забороняється торкатися до струмопровідних частин електричного кола, доки коло знаходиться під напругою.

7. Забороняється виконувати будь-які операції з обладнанням розподільного щита лабораторії.

8. У разі виявлення іскріння контактів, запаху горілої ізоляції або нагрітого металу слід негайно вимкнути блок науково-дослідного стенду з джерелами, які живлять електричне коло, та знеструмити вимірювальні прилади. Негайно звернутися по допомогу до викладача, який має право вимкнути рубильник на розподільному щиті.

9. Усі особисті речі, що не мають відношення до виконання лабораторної роботи (портфелі, валізки, одяг) студенти зобов'язані залишити у спеціально призначеному для цього місці в лабораторії.

10. Під час лабораторних занять студенти мають додержуватись тиші та порядку, не виходити з приміщення без дозволу викладача. Лабораторне заняття триває без перерви і закінчується за 5 хвилин до перерви перед наступною парою.

11. Наприкінці заняття потрібно привести робоче місце в порядок і повернути лаборанту додаткове обладнання, яке було надано бригаді для виконання роботи.

РОБОЧЕ МІСЦЕ СТУДЕНТСЬКОЇ БРИГАДИ

Лабораторні заняття за темами «Електричні кола за постійних струмів», «Лінійні електричні кола однофазного синусоїдного струму», «Лінійні електричні кола трифазного струму» та «Перехідні процеси в лінійних колах» виконують у спеціалізованих лабораторіях кафедри теоретичної електротехніки, оснащених навчально-дослідними лабораторними стендами (НДЛС) «Практика». Для виконання лабораторної роботи кожна бригада отримує додаткові комплектуючі, а саме: з'єднувальні проводи, набірні резистори, які впаяні у прозорі пластмасові корпуси з двома штирьовими затискачами, та перемички. Для здійснення вимірювань параметрів електричних величин використовують вимірювальні прилади різних типів та осцилограф, що розміщені зверху на стенді.

Візуально в структурі НДЛС можна виділити три структурні частини: ліва частина вміщує джерела енергії, середня – являє собою складальне поле, права частина вміщує блоки пасивних елементів.

Джерела енергії стенда згруповані у блоки: блок постійної напруги, блок змінної напруги і блок трифазної напруги. **Блок постійної напруги** вміщує два джерела і електронний ключ, який перемикається з промисловою частотою і використовується під час моделювання перехідних процесів. Одне з джерел забезпечує постійну стабілізовану напругу з незмінним значенням 20...22 (В). Значення ЕРС іншого джерела регулюється в межах 1...30 (В). **Блок змінної напруги** являє собою джерело однофазної змінної напруги регульованої частоти від 0,5 до 10 (кГц) синусоїдної, прямокутної або трикутної форми. Напруга регулюється від 5 до 25 (В). Форма й рівень вихідної напруги блоку змінної напруги встановлюються відповідними

перемикачами та ручками: «ФОРМА», «ЧАСТОТА ГРУБО», «ЧАСТОТА ПЛАВНО» та «УРОВЕНЬ». **Блок трифазної напруги** забезпечує споживачі трифазною напругою промислової частоти 25 (Гц). Початки і кінці трьох фаз джерела виведені на передню панель блоку, що дає змогу зв'язувати фази «зіркою» або трикутником за бажанням користувача. Діюче значення кожної фазної напруги регулюється ступінчасто у межах від 1 до 40 (В).

Приведення до дії будь-якого джерела напруги здійснюється переведенням тумблера «СЕТЬ», розміщеного на передній панелі відповідного джерела, у положення «ВКЛ». При цьому висвітлюється індикатор «СЕТЬ». В блоці трифазної напруги, окрім загального тумблера «СЕТЬ», є тумблери для вмикання окремо кожної фази. Усі джерела живлення мають швидкодіючу електронну систему захисту від перевантажень. Струм спрацьовування захисту – 1 (А). При перевантаженнях в блоках спрацьовує захист, про що сповіщає індикатор «ЗАЩИТА». Для наступного використання джерела енергії слід усунути причину, яка веде до спрацьовування захисту, і натиснути на кнопку «ЗАЩИТА». При цьому коло захисту розмикається, індикатор «ЗАЩИТА» гасне, що свідчить про готовність джерела живлення до подальшої роботи.

Пасивні елементи НДЛС згруповані на кілька блоків: по два однакових блоки резисторів та конденсаторів і один блок індуктивностей. На передніх панелях блоків є гнізда для приєднання проводів, за допомогою яких елементи блоків вмикаються у схему. **Блок резисторів** вміщує три нерегульовані резистори: $R_1 = 100$ (Ом), $R_2 = 200$ (Ом), $R_3 = 400$ (Ом) і магазин опорів R_4 з ступінчастим регулюванням від 1 до 999 (Ом) з мінімальним кроком 1 (Ом). Гранична потужність – 5 (Вт).

Блок конденсаторів вміщує три нерегульовані конденсатори з ємностями $C_1 = 5$ (мкФ), $C_2 = 10$ (мкФ), $C_3 = 20$ (мкФ) і магазин конденсаторів C_4 з ступінчастим регулюванням у межах 0,01...9,99 (мкФ) з мінімальним кроком 0,01 (мкФ). Гранична допустима напруга на конденсаторах – 160 (В).

Блок індуктивностей вміщує три нерегульовані котушки індуктивності: $L_1 = 1$ (Гн), $L_2 = 1,5$ (Гн), $L_3 = 2$ (Гн), і магазин індуктивностей L_4 з ступінчастим регулюванням у діапазоні 0,1...99,9 (мГн) з мінімальним кроком 0,1 (мГн). Котушки L_1 та L_2 мають індуктивний зв'язок. Допустима сила струму через котушки індуктивності становить 0,2 (А).

Складальне поле являє собою панель з 67 парами гнізд, з'єднаних між собою на внутрішній стороні панелі у вузли по 4, 3 або 2 гнізда. Схема з'єднання гнізд зображена рисками на передній панелі складального поля. Гнізда призначені для закріплення набірних елементів електричних кіл та проводів. Набірні елементи (резистори, конденсатори та котушки індуктивності) впаяні у прозорі пластмасові корпуси з двома штирьовими виводами. До комплекту стенду входить набір з'єднувальних проводів зі штекерами, призначених для приєднання до складального поля джерел енергії, пасивних елементів та вимірювальних пристроїв.

Індикаторні панелі вимірювальних приладів, які входять до складу НДЛС, розміщені на лицьових панелях блоків джерел і призначені лише для контролю значень вихідного струму і напруги відповідного джерела. Для дослідницьких цілей потрібно скористатися приладами більш високого класу точності, якими стенди оснащуються додатково залежно від робочого завдання. У лабораторіях кафедри теоретичної електротехніки для здійснення досліджень задіяні такі вимірювальні прилади: цифровий мультиметр (клас точності 3), амперметр і вольтметр електромагнітної системи (клас точності 2), ватметр електродинамічної системи, фазометр, осцилограф.

Під час експериментальних досліджень потрібно уважно стежити за тим, щоб струми в окремих вітках кола не перевищували 200-250 (мА). За загальними правилами користування контрольно-вимірювальними приладами перед початком роботи на всіх багатомежних приладах слід встановлювати найбільшу межу виміру з метою запобігання виходу їх з ладу. Під час досліджень в лабораторіях кафедри заздалегідь відомими є наближені значення вхідних напруг, тому можна одразу встановлювати потрібний діапазон для вимірів. Бажано усі вимірювання впродовж лабораторних досліджень здійснювати без зміни діапазону вимірювання, оскільки перехід на іншу межу завжди пов'язаний зі зміною внутрішнього опору приладу, а, відповідно, і опору тієї частини електричного кола, де цей прилад використовується.

За неохайне ставлення до лабораторного обладнання студент (бригада в повному складі) може бути відсторонений від виконання роботи. У разі пошкодження лабораторного обладнання через необережність або внаслідок самовільного вмикання електричного кола без перевірки викладачем, вся бригада несе матеріальну відповідальність у встановленому порядку.

Лабораторна робота №31

ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИФАЗНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА ПРИ З'ЄДНАННІ ДЖЕРЕЛА І ПРИЙМАЧА ЗІРКОЮ

Мета роботи:

Ознайомлення з особливостями симетричних та несиметричних режимів роботи трифазного електричного кола при з'єднанні фаз джерела і приймача зіркою.

Отримання навичок побудови суміщених векторних діаграм напруг та струмів для різних режимів роботи трифазного кола.

Підготовка до роботи

Вивчити рекомендовану літературу, ознайомитися з методичними вказівками до роботи, описом лабораторної установки, робочим завданням, підготувати протокол звіту і відповісти на наступні питання:

1. Яка трифазна система ЕРС, напруг і струмів вважається симетричною?
2. Що розуміють під фазою трифазного кола ?
3. Які переваги трифазних систем порівняно з однофазними?
4. Дати визначення поняттям : "симетричний приймач", "симетричне трифазне коло", "симетричний режим роботи трифазного кола".
5. Які співвідношення між фазними та лінійними напругами і струмами при симетричному режимі трифазного кола?
6. Яке призначення нульового проводу в трифазному електричному колі?
7. Як будується суміщена векторна діаграма струмів і напруг трифазного кола ?
8. Як виміряти активну потужність трифазного споживача ?
9. Як визначити кут зсуву за фазою між напругою і струмом, користуючись амперметром, вольтметром та ватметром ?

Опис лабораторної установки

Трифазним джерелом енергії є блок трифазної напруги навчально-дослідного стенду (НДЛС), який складається з трьох незалежно регульованих від 0 до 39 В джерел синусоїдної напруги частотою 50 Гц. Зсув за фазою між напругами дорівнює 120 електричних градусів. Максимальний струм кожного джерела 1 А. Діючі значення напруг і струмів вимірюються універсальними електронними приладами. Активні потужності вимірюються ватметрами електродинамічної системи. Досліджуване електричне коло складається на наборному полі стенду.

Порядок виконання роботи

1. З'єднати зіркою окремі фази трифазного джерела (рис.31.1).

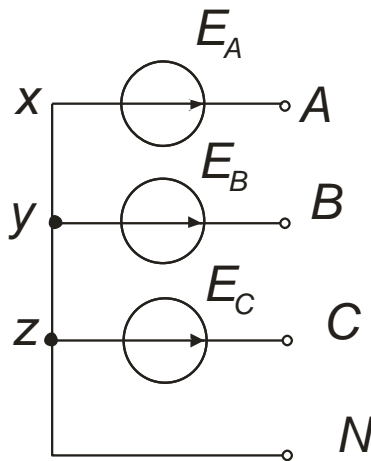


Рис.31.1

2. Відповідно до номеру бригади встановити напруги кожної з фаз джерела однаковими у межах, зазначених у табл. 31.1.

Таблиця 31.1

Номер	1	2	3	4	5	6	7	8
U_{ϕ}, B	8	9	10	11	12	13	14	15

3. Виміряти фазні та лінійні напруги симетричного трифазного джерела. Результати вимірювань занести до табл.31.2 (режим 1).

4. Поміняти місцями полюси джерела фази A. Знову виміряти фазні та лінійні напруги трифазного джерела. Результати вимірювань занести до табл.31.2 (режим 2).

Таблиця 31.2

Режим	U_{AN}	U_{BN}	U_{CN}	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}
1						
2						

5.Відновити схему симетричного трифазного джерела, яка відповідає режиму **1**.

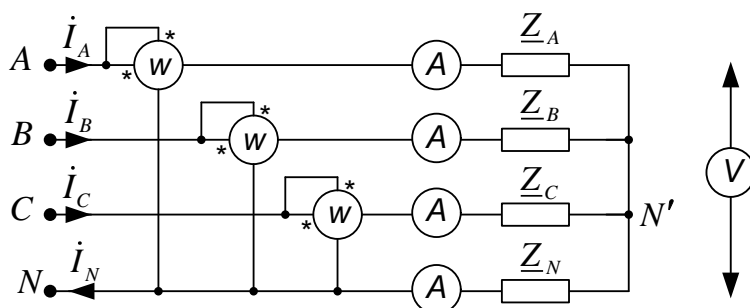


Рис. 31.2

6. Скласти на наборному полі трифазне коло з нульовим проводом, схема якого зображена на рис. 31.2. Виміряти та занести до табл. 31.3 значення напруг, струмів та потужностей для таких режимів:

- а)** симетричне активне навантаження $\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C = R$;
- б)** обрив однієї з фаз при симетричному активному навантаженні;
- в)** несиметричне активне навантаження;
- г)** несиметричне різнохарактерне навантаження .

Значення та характер опорів \underline{Z}_A , \underline{Z}_B , \underline{Z}_C у фазах приймача обираються за вказівкою викладача.

Таблиця 31.3

[illegible]

6. Порівняти результати розрахунків з експериментальними даними.

7. Зробити висновки по роботі:

а) про вплив нейтрального проводу на режим роботи трифазного електричного кола;

б) про вплив зміни характеру та величини опорів навантаження на напруги окремих фаз за наявності нейтрального проводу та при його відсутності.

Методичні вказівки

Генерування, розподіл та споживання електричної енергії на промисловій частоті зазвичай реалізується за допомогою трифазних систем, які складаються з трифазних джерел, споживачів та ліній електропередачі. Трифазне джерело генерує, як правило, симетричну систему електрорушійних сил (ЕРС), що є сукупністю трьох синусоїдних ЕРС однакової частоти та амплітуди, зсунутих за фазою на кут $\alpha = k \frac{2\pi}{3}$, де $k=1,2,3$.

Фази позначаються початковими літерами латинського алфавіту A, B, C . Миттєві значення ЕРС окремих фаз джерела позначають e_A, e_B, e_C . А їх діючі значення E_A, E_B, E_C

Електричне коло, в якому діє трифазне джерело, називається трифазним. Ділянка трифазного кола, через яку проходить один і той же струм, називається фазою цього кола. Вирізняють фази джерела, приймача та лінії електропередачі.

На практиці застосовуються зв'язані трифазні системи, в яких ЕРС окремих фаз джерела з'єднані зіркою (рис.31.1), або трикутником.

Спільний вузол фазних ЕРС з'єднаних зіркою, називається нульовим, чи нейтральним вузлом генератора і позначається літерою N .

Напруги між затискачами A, B, C та нульовою точкою N трифазного джерела

$$\dot{U}_{AN} = \dot{E}_A; \quad \dot{U}_{BN} = \dot{E}_B; \quad \dot{U}_{CN} = \dot{E}_C$$

називаються фазними напругами джерела. Напруги між затискачами A , B , C трифазного джерела

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_{AN} - \dot{U}_{BN}; \quad \dot{U}_{BC} = \dot{U}_{BN} - \dot{U}_{CN}; \quad \dot{U}_{CA} = \dot{U}_{CN} - \dot{U}_{AN}$$

називаються лінійними напругами джерела.

На рис. 31.4 наведена векторна діаграма напруг трифазного симетричного генератора з прямим чергуванням фаз.

Враховуючи, що діючі значення усіх фазних напруг однакові ($U_{AN} = U_{BN} = U_{CN} = U_\phi$), з векторної діаграми одержимо:

$$\dot{U}_{AB} = \sqrt{3}U_\phi e^{+j\pi/6} = U_\lambda e^{j\pi/6}; \quad \dot{U}_{BC} = U_\lambda e^{-j\pi/2}; \quad \dot{U}_{CA} = U_\lambda e^{+j5\pi/6}$$

Отже, діючі значення лінійної та фазної напруг у симетричному трифазному джерелі зв'язані між собою співвідношенням $U_\lambda = \sqrt{3}U_\phi$. Трифазний приймач називається симетричним, якщо комплексні опори усіх його фаз однакові. Трифазне коло називається симетричним, якщо воно складається з симетричного генератора, симетричного приймача та симетричної трифазної лінії. У симетричному трифазному колі трифазні системи струмів і напруг також будуть симетричними. Режим трифазного кола, в якому трифазні системи напруг і струмів симетричні, називається симетричним.

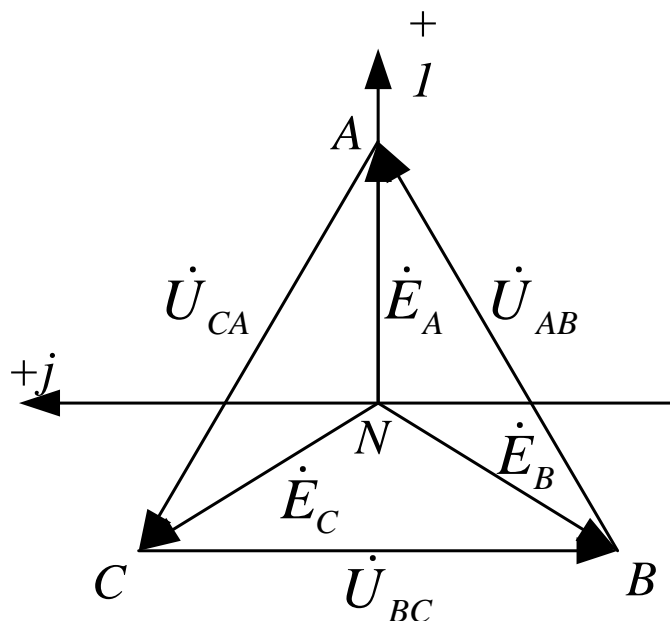


Рис. 31.4

Якщо опори фаз джерела та приймача з'єднані зіркою, отримаємо чотирипровідне трифазне коло, в якому нульові точки генератора N та споживача N' з'єднані нульовим (нейтральним) проводом (рис. 31.2). Нульовий провід використовується для забезпечення незалежності режиму кожної з фаз від зміни навантаження інших фаз.

Режим трифазного кола при з'єднанні фаз генератора та приймача зіркою розраховують, зазвичай, методом двох вузлів. Спочатку визначають напругу між нульовими точками (зсув нейтралі):

$$\dot{U}_{N'N} = \frac{\dot{U}_{AN} \underline{Y}_A + \dot{U}_{BN} \underline{Y}_B + \dot{U}_{CN} \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \underline{Y}_N} \quad (31.1)$$

де \underline{Y}_A , \underline{Y}_B , \underline{Y}_C , \underline{Y}_N - комплексні провідності фаз споживача та нейтрального проводу:

$$\underline{Y}_A = \frac{1}{\underline{Z}_A}; \quad \underline{Y}_B = \frac{1}{\underline{Z}_B}; \quad \underline{Y}_C = \frac{1}{\underline{Z}_C}; \quad \underline{Y}_N = \frac{1}{\underline{Z}_N}. \quad (31.2)$$

Далі обчислюють напруги на фазах приймача:

$$\dot{U}_{AN'} = \dot{U}_{AN} - \dot{U}_{N'N}; \dot{U}_{BN'} = \dot{U}_{BN} - \dot{U}_{N'N}; \dot{U}_{CN'} = \dot{U}_{CN} - \dot{U}_{N'N}. \quad (31.3)$$

Напрямок струмів у фазах та в нульовому проводі рекомендується обирати такими, як на рис. 31.2.

Тоді лінійні (вони ж і фазні) струми розраховуються за законом Ома:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_{AN'}}{\underline{Z}_A} = \dot{U}_{AN'} \underline{Y}_A;$$

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{U}_{BN'}}{\underline{Z}_B} = \dot{U}_{BN'} \underline{Y}_B;$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{U}_{CN'}}{\underline{Z}_C} = \dot{U}_{CN'} \underline{Y}_C;$$

$$\dot{I}_N = \frac{\dot{U}_{N'N}}{\underline{Z}_N} = \dot{U}_{N'N} \underline{Y}_N \quad \text{чи} \quad \dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C.$$

Чим меншим буде опір \underline{Z}_N , тим меншою буде напруга зсуву нейтралі $\dot{U}_{N'N}$, і тим менше відрізнятимуться напруги споживача від однойменних фазних напруг трифазного джерела. Якщо нульовий провід відсутній ($Y_N = 0$), розрахунок проводиться у тій же послідовності, але при цьому $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$.

За відсутності нульового проводу при розрахунку раціонально використовувати не фазні, а лінійні напруги джерела. У цьому випадку фазні напруги споживача визначають за формулами:

$$\dot{U}_{AN'} = \frac{\dot{U}_{AB} \underline{Y}_B - \dot{U}_{CA} \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C}; \quad \dot{U}_{BN'} = \frac{\dot{U}_{BC} \underline{Y}_C - \dot{U}_{AB} \underline{Y}_A}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C};$$

$$\dot{U}_{CN'} = \frac{\dot{U}_{CA} \underline{Y}_C - \dot{U}_{BC} \underline{Y}_B}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C}.$$

Струм та напругу симетричного трифазного кола можна розраховувати лише для однієї фази, наприклад, для фази A . Дійсно, як випливає з (31.1),

при $\underline{Y}_A = \underline{Y}_B = \underline{Y}_C = \underline{Y}$, зсув нейтралі дорівнює нулю, незалежно від величини опору \underline{Z}_N . При цьому $\dot{U}_{AN'} = \dot{U}_{AN}$ та $\dot{I}_A = \dot{U}_{AN} \underline{Y}_A$, а струми інших фаз будуть дорівнювати: $\dot{I}_B = \dot{I}_A e^{\frac{j2\pi}{3}}$; $\dot{I}_C = \dot{I}_A e^{\frac{j4\pi}{3}}$.

У трифазному електричному колі виконується баланс потужностей, зокрема, сумарна активна потужність усіх фаз генератора дорівнює сумарній активній потужності трифазного споживача.

У чотирипровідному трифазному електричному колі сумарну активну потужність вимірюють за допомогою трьох ватметрів (рис.31.2). Кожен з них вимірює активну потужність, яка генерується однією з фаз джерела:

$$P_A = U_{AN} I_A \cos \varphi_A; P_B = U_{BN} I_B \cos \varphi_B; P_C = U_{CN} I_C \cos \varphi_C,$$

де $\varphi_A, \varphi_B, \varphi_C$ - кути зсуву фаз, відповідно, між векторами фазних напруг генератора $\dot{U}_{AN}, \dot{U}_{BN}, \dot{U}_{CN}$ та струмів $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$.

У трипровідному трифазному електричному колі активну потужність, що споживається трифазним приймачем, визначають як суму показів двох ватметрів, підключених за схемою рис. 31.3:

$$P_1 = U_{AC} I_A \cos \varphi_1, P_2 = U_{BC} I_B \cos \varphi_2, P = P_1 + P_2$$

де φ_1 - кут зсуву фаз між лінійною напругою \dot{U}_{AC} та струмом \dot{I}_A ; φ_2 - кут зсуву фаз між лінійною напругою \dot{U}_{BC} та струмом \dot{I}_B . Слід враховувати, що один з кутів (φ_1 або φ_2) за модулем може перевищувати 90 градусів. У цьому випадку стрілка електродинамічного ватметра відхилиться вліво від нулевої відмітки шкали. У цьому випадку перемикач полярності ватметра з положення "+" переводять в положення "-" і показ ватметра записують від'ємним.

Результати вимірювань, чи розрахунків струмів та напруг трифазного кола, супроводжують побудовою суміщеної векторної діаграми. На рис. 31.5, як приклад, наведена суміщена векторна діаграма трифазного кола, зображеного на рис.31.2 при несиметричному навантаженні фаз, коли

комплексні опори \underline{Z}_A та \underline{Z}_B - мають активно-індуктивний, а \underline{Z}_C - активно-ємнісний характер. Опір \underline{Z}_N - суто активний.

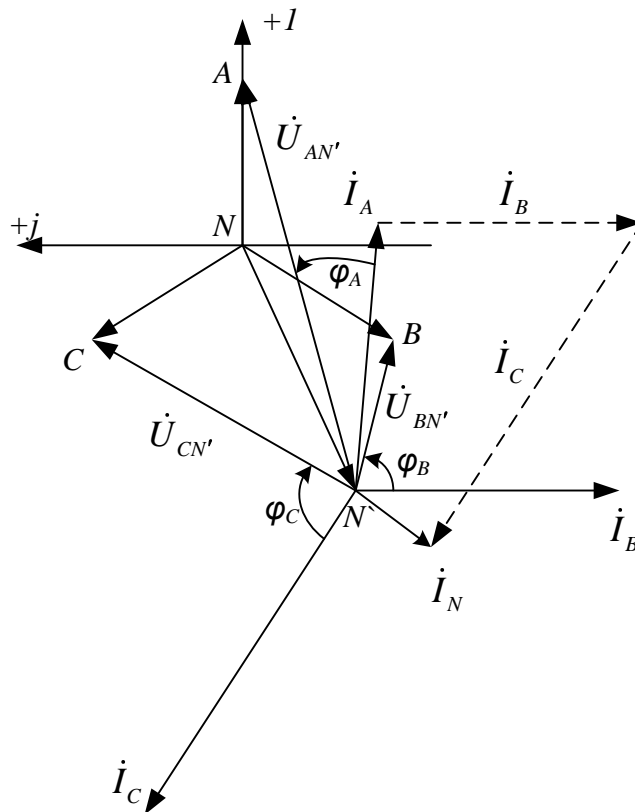


Рис. 31.5

При побудові діаграми комплексний потенціал нульової точки генератора рекомендується вважати нульовим. На діаграмі позначаються комплексні напруги фаз генератора.

За результатами вимірювань діаграма будується у такій послідовності:

1) 3 точок A, B, C роблять засічки радіусами, які у масштабі дорівнюють, відповідно, напругам $U_{AN'}$, $U_{BN'}$, $U_{CN'}$. Місце перетину цих засічок відповідає точці N' ; будуються вектори $\dot{U}_{AN'}$, $\dot{U}_{BN'}$, $\dot{U}_{CN'}$ та $\dot{U}_{N'N}$.

2) 3 точки N' згідно з масштабом струмів, відкладають вектори струмів \dot{i}_A , \dot{i}_B , \dot{i}_C . Геометрична сума векторів \dot{i}_A , \dot{i}_B , \dot{i}_C дорівнює вектору струму \dot{i}_N в нульовому провіді.

Під час експерименту кути зсуву фаз визначають за допомогою фазометра, чи обчислюють через покази ватметра, вольтметра та амперметра.

При цьому слід чітко уявляти, відносно якої напруги визначається кут (фазної або лінійної, генератора або споживача), залежно від того, куди підімкнена обмотка напруги вимірювального приладу.

Питання для самостійної роботи

1. Проаналізувати, за яких умов послідовність чергування фаз напруг приймача стане зворотною порівняно з послідовністю чергування фаз генератора в схемі, що зображена на рис. 31.3.

2. Визначити, за яких умов один з ватметрів схеми рис. 31.3, при симетричному навантаженні:

- а) показує нуль;
- б) дає від'ємний показ.

Література:

1. Теоретичні основи електротехніки: Підручник: У 3 т. / В.С. Бойко, В.В. Бойко, Ю.Ф. Видолоб та ін.; За заг. ред. І.М. Чиженка, В.С. Бойка. – К.: ІВЦ “Видавництво «Політехніка»”, 2004. – Т.1: Усталені режими лінійних електричних кіл із зосередженими параметрами. – С. 191-217.

2. Лінійні електричні кола синусоїдального та періодичного несинусоїдного струму: Навч. посіб./ Щерба А.А., Курило І.А., Кудря Є.А., Намацалюк І.Н., Чибеліс В.І., Перетятко Ю.В. – К.: Лазурит-Поліграф, 2012. – С.113-185

3. Перхач В.С. Теоретична електротехніка: Лінійні кола: Підручник. К: Вища школа., 1992. - 439 с.

4. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники, Т1. Учебник. - Л.: Энергоиздат, 1981. - 536 с.

5. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. Основы теории цепей: Учебник. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 528 с.

Лабораторна робота №32

ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИФАЗНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА ПРИ З'ЄДНАННІ ПРИЙМАЧА ТРИКУТНИКОМ.

Мета роботи

Ознайомлення з особливостями симетричного та несиметричного режимів трифазного електричного кола при з'єднанні споживачів трикутником.

Отримання навичок побудови суміщених векторних діаграм напруг та струмів для різних режимів роботи трифазного кола.

Підготовка до роботи

Вивчити рекомендовану літературу, ознайомитися з методичними вказівками до роботи, описом лабораторної установки, робочим завданням, підготувати протокол звіту і відповісти на наступні питання:

1. Що розуміють під трифазною симетричною системою ЕРС ?
2. Яке трифазне електричне коло називають симетричним ?
3. Що розуміють під фазою трифазного електричного кола ?
4. Як з'єднати трикутником: а) фази джерела; б) фази приймача ?
5. Які напруги називаються: а) фазними; б) лінійними (між фазними)? Як відрховуються їх додатні значення при з'єднанні трикутником?
6. Які співвідношення між фазними та лінійними струмами і напругами в симетричному трифазному колі при з'єднанні трикутником?
7. Як розрахувати струми в трифазному колі при з'єднанні приймача трикутником через відомі комплексні лінійні напруги \dot{U}_{AB} , \dot{U}_{BC} , \dot{U}_{CA} на вході лінії, та комплексні опори фаз $\underline{Z}_{A'B'}$, $\underline{Z}_{B'C'}$, $\underline{Z}_{C'A'}$. У двох випадках:
а) $Z_{L_A} = Z_{L_B} = Z_{L_C} = 0$;
б) $Z_{L_A} = Z_{L_B} = Z_{L_C} \neq 0$.
8. Як вимірюється активна потужність трифазного кола ?

9. Як визначити кут зсуву за фазою між напругою та струмом, користуючись показами амперметра, вольтметра і ватметра ?

Опис лабораторної установки

Трифазним джерелом енергії є блок трифазної напруги навчально-дослідного стенду (НДЛС), який складається з трьох незалежно регульованих від нуля до 39 В джерел синусоїдної напруги частотою 50 Гц. Кут зсуву за фазою між напругами дорівнює 120 електричних градусів. Максимальний струм кожного джерела 1 А. Діючі значення напруг і струмів вимірюються універсальними електронними приладами. Активні потужності вимірюються ватметрами електродинамічної системи. Досліджуване електричне коло складається на наборному полі стенду.

Порядок виконання роботи

1. На наборному полі НДЛС скласти коло (рис.32.1), з однаковими опорами лінійних провідників $\underline{Z}_{\text{л}A} = \underline{Z}_{\text{л}B} = \underline{Z}_{\text{л}C} = R_{\text{л}}$, та опорами навантаження

$$\underline{Z}_{A'B'} = \underline{Z}_{B'C'} = \underline{Z}_{C'A'} = R_{\phi}.$$

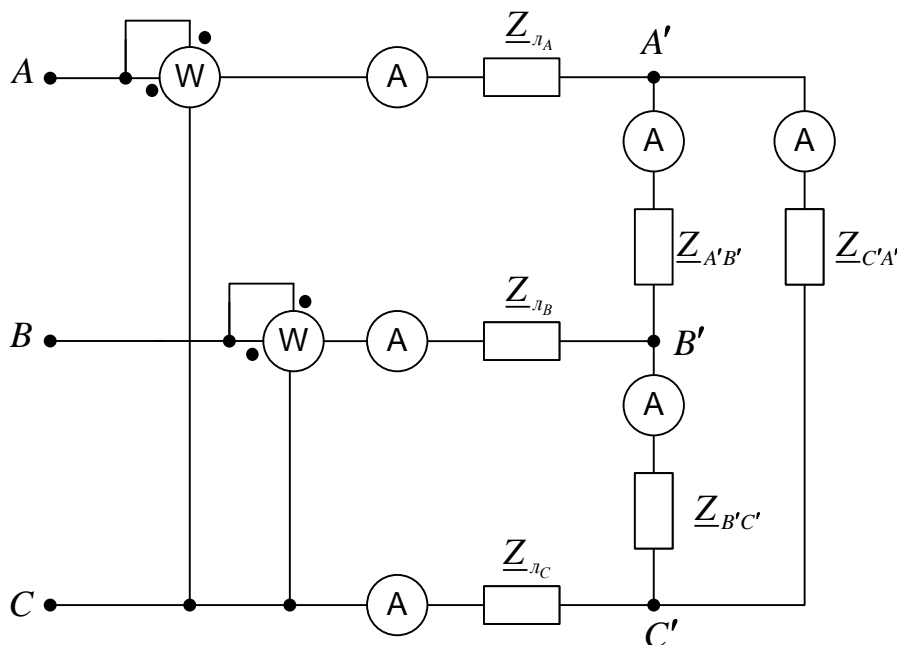


Рис. 32.1

Занести до таблиці 32.1 значення струмів, напруг та потужностей наступних режимів роботи резистивного кола:

1.а - при симетричному навантаженні усіх фаз;

1.б - при обриві одного з лінійних проводів однієї з фаз;

1.в - при відключенні одного з приймачів енергії.

2. Створити несиметричний режим роботи. Для цього замість активного опору $R_{B^{\sim}C^{\sim}}$ відімкнути конденсатор C_2 , а замість активного опору $R_{C^{\sim}A^{\sim}}$ підключити індуктивну котушку L_2 . Занести до табл. 32.1 значення струмів, напруг та покази ватметрів, для наступних режимів роботи:

2. а - при несиметричному навантаженні фаз;

2. б - при обриві одного з лінійних проводів;

2. в - при відключенні одного з приймачів енергії.

Обробка результатів експерименту

1. За даними табл. 32.1 для кожного з досліджених режимів побудувати у масштабі векторно-топографічні діаграми напруг та струмів.

2. Користуючись діаграмами для дослідів за пунктом 2 визначити кути зсуву фаз між напругою та струмом кожного приймача енергії. Результати розрахунків занести до табл. 32.2.

Таблиця 32.2

Номер дослідів	Кути зсуву за фазою		
	$\varphi_{A^{\sim}B^{\sim}}$	$\varphi_{B^{\sim}C^{\sim}}$	$\varphi_{A^{\sim}B^{\sim}}$
2.а			
2.б			
2.в			

3. Користуючись результатами вимірів напруг, струмів та кутів зсуву за фазою, обчислити для всіх досліджених режимів активну потужність трифазного кола. Зіставити її з сумою показів ватметрів.

4. Зробити висновки по роботі

а) про вплив несиметрії навантаження на режим роботи трифазного електричного кола;

б) про особливості режиму роботи фаз, що залишилися в роботі при аварійних ситуаціях в трифазному колі.

Методичні вказівки

Загальна характеристика трифазного електричного кола та основні положення щодо нього наведені у методичних вказівках до лабораторної роботи №31. Розглянемо особливості роботи та розрахунку трифазного кола при з'єднанні споживачів трикутником.

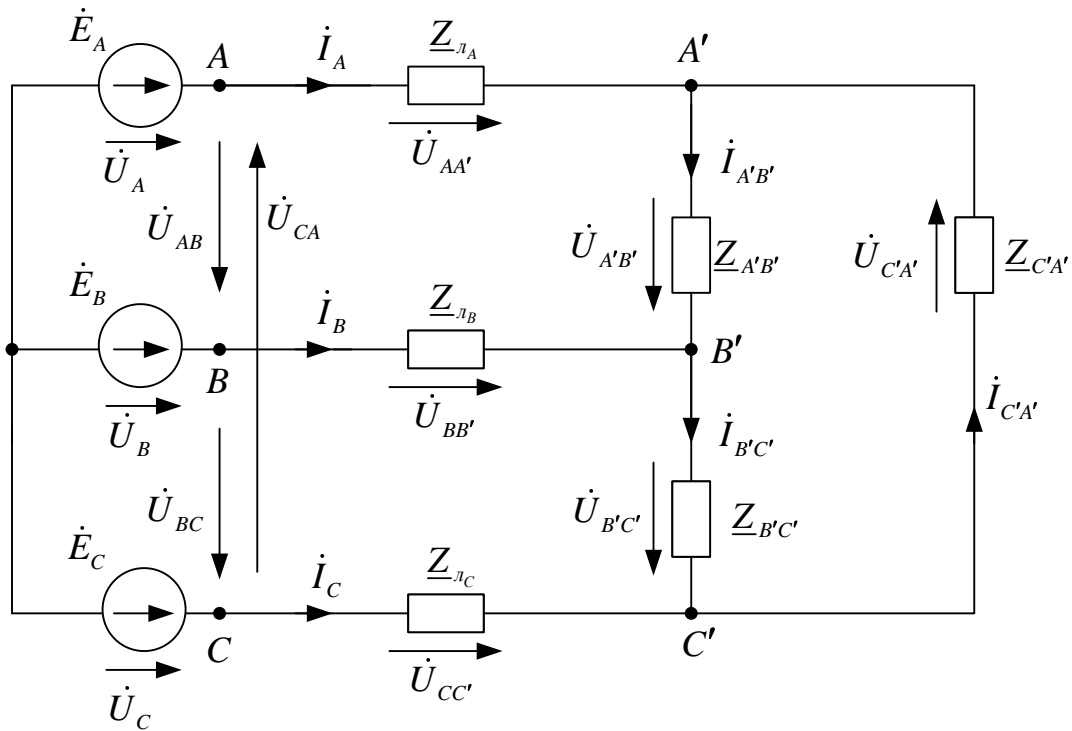


Рис. 32.2

Початки обмоток трифазного джерела позначають літерами A, B, C , а їх кінці, відповідно, літерами x, y, z . При з'єднанні обмоток джерела трикутником, об'єднуються кінець першої обмотки x з початком другої B , кінець другої y з початком третьої C , а кінець третьої z з початком першої A , як це показано на рис. 32.2. Вузли трикутника навантаження позначають літерами A', B', C' . Вони з'єднуються з затискачами A, B, C джерела лінійними проводами $A-A', B-B', C-C'$. Струми, що проходять у лінійних проводах, називаються лінійними і позначаються $\dot{I}_A, \dot{I}_C, \dot{I}_B$.

Кожна обмотка джерела називається фазою джерела. Кожний опір навантаження $\underline{Z}_{A'B'}$, $\underline{Z}_{B'C'}$, $\underline{Z}_{C'A'}$ називається фазою навантаження. Фази джерела та навантаження характеризуються фазними напругами та фазними

струмами. Фазні напруги джерела позначають: \dot{U}_{AB} , \dot{U}_{BC} , \dot{U}_{CA} . Відповідно фазні напруги споживача - $U_{A'B'}$, $U_{B'C'}$, $U_{C'A'}$. За другим законом Кірхгофа: $\dot{U}_{AB} + \dot{U}_{BC} + \dot{U}_{CA} = 0$. У потужного трифазного генератора опорами фазних обмоток можна знехтувати і вважати, що в кожній фазі напруга дорівнює ЕРС (рис. 32.2):

$$U_{AB} = E_{AB}; U_{BC} = E_{BC}; U_{CA} = E_{CA}.$$

Лінійні напруги на початку трифазної лінії електропередачі дорівнюють відповідним фазним напругам трифазного джерела. Лінійні напруги в кінці трифазної лінії електропередачі дорівнюють відповідним фазним напругам трифазного споживача. Напруга на проводах лінії, відрахована у напрямку лінійного струму, називається спадом напруги на лінії і позначається: $\dot{U}_{AA'}$, $\dot{U}_{BB'}$, $\dot{U}_{CC'}$. Напрямки позитивного відліку струмів, напруг та ЕРС при з'єднанні трикутником обмоток джерела і опорів навантаження показані на рис. 32.2.

Трифазне джерело є симетричним, якщо створює сукупність ЕРС, однакових за величиною і частотою, які зсунені між собою на третину періоду:

$$\dot{E}_A = U_{\text{л}} e^{j0}; \dot{E}_B = U_{\text{л}} e^{-j120^\circ}; \dot{E}_C = U_{\text{л}} e^{j120^\circ}.$$

Симетрична трифазна лінія електропередачі має однакові опори лінійних проводів: $\underline{Z}_{\text{л}A} = \underline{Z}_{\text{л}B} = \underline{Z}_{\text{л}C}$. Трифазне навантаження буде симетричним, якщо комплексні опори всіх його фаз однакові: $\underline{Z}_{AB} = \underline{Z}_{BC} = \underline{Z}_{CA}$. Симетричне трифазне електричне коло складається з симетричного джерела, з'єднаного з симетричним навантаженням симетричною лінією електропередачі.

У симетричному трифазному колі:

1) лінійні струми \dot{I}_A , \dot{I}_B , \dot{I}_C утворюють симетричну систему:

$$\dot{I}_B = a^2 \dot{I}_A; \dot{I}_C = a \dot{I}_A, \text{ де } a = e^{j120^\circ}.$$

2) фазні струми також утворюють симетричну систему:

$$\dot{I}_{B'C'} = a^2 \dot{I}_{A'B'}; \dot{I}_{C'A'} = a \dot{I}_{A'B'}$$

3) діюче значення лінійного струму в $\sqrt{3}$ більше за фазне:

$$I_{\text{л}} = \sqrt{3}I_{\phi}$$

4) взаємне розміщення векторів фазних та лінійних струмів при прямому чергуванні фаз зображене на рис. 32.3.

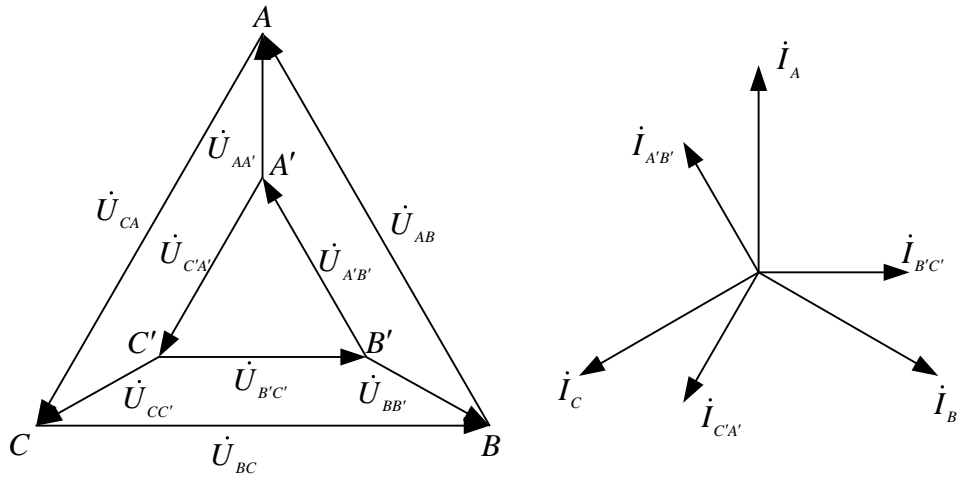


Рис. 32.3

У трифазному колі рис.32.2 лінійні струми зв'язані рівнянням за першим законом Кірхгофа: $I_A + I_B + I_C = 0$. Лінійні струми зв'язані з фазними також першим законом Кірхгофа :

$$\text{для вузла } A' \quad I_A = I_{A'B'} - I_{C'A'};$$

$$\text{для вузла } B' \quad I_B = I_{B'C'} - I_{A'B'}; \quad (32.1)$$

$$\text{для вузла } C' \quad I_C = I_{C'A'} - I_{B'C'}.$$

Напруги, обумовлені цими струмами в опорах лінії та споживача, зв'язані з напругою джерела рівняннями за другим законом Кірхгофа:

$$U_{AB} = U_{AA'} + U_{A'B'} - U_{BB'};$$

$$U_{BC} = U_{BB'} + U_{B'C'} - U_{CC'};$$

$$U_{CA} = U_{CC'} + U_{C'A'} - U_{AA'};$$

$$U_{A'B'} + U_{B'C'} + U_{C'A'} = 0.$$

Напруга та струм у кожному з опорів зв'язані між собою через закон Ома:

$$U_{AA'} = I_A Z_{\text{л}A}; \quad U_{BB'} = I_B Z_{\text{л}B}; \quad U_{CC'} = I_C Z_{\text{л}C};$$

$$\dot{U}_{A'B'} = \dot{I}_{A'B'} \underline{Z}_{A'B'}; \dot{U}_{B'C'} = \dot{I}_{B'C'} \underline{Z}_{B'C'}; \dot{U}_{C'A'} = \dot{I}_{C'A'} \underline{Z}_{C'A'}.$$

Розрахунок фазних струмів у трифазному колі, при з'єднанні приймачів трикутником та відомих лінійних напругах, виконується за формулами:

$$\dot{I}_{A'B'} = \frac{\dot{U}_{A'B'}}{\underline{Z}_{A'B'}}; \dot{I}_{B'C'} = \frac{\dot{U}_{B'C'}}{\underline{Z}_{B'C'}}; \dot{I}_{C'A'} = \frac{\dot{U}_{C'A'}}{\underline{Z}_{C'A'}}.$$

Лінійні струми розраховують за рівняннями (32.1).

Якщо лінійні проводи мають опори, якими знехтувати не можна, розрахунок слід виконувати у такій послідовності:

- 1) перетворити трикутник опорів навантаження на еквівалентну зірку;
- 2) розрахувати лінійні струми за методикою розрахунку «зірки» без нульового проводу, наведеною у лабораторній роботі №31;
- 3) за другим законом Кірхгофа через відомі лінійні струми розрахувати напруги на лінійних проводах та фазах споживача;
- 4) за законом Ома обчислити струми в фазах споживача, з'єднаного трикутником.

Результати розрахунків або вимірювань струмів та напруг доцільно ілюструвати побудовою векторної діаграми кола. Приклад такої діаграми для електричного кола, зображеного на рис. 32.1 з активними опорами лінійних проводів та фаз навантаження наведений на рис. 32.4.

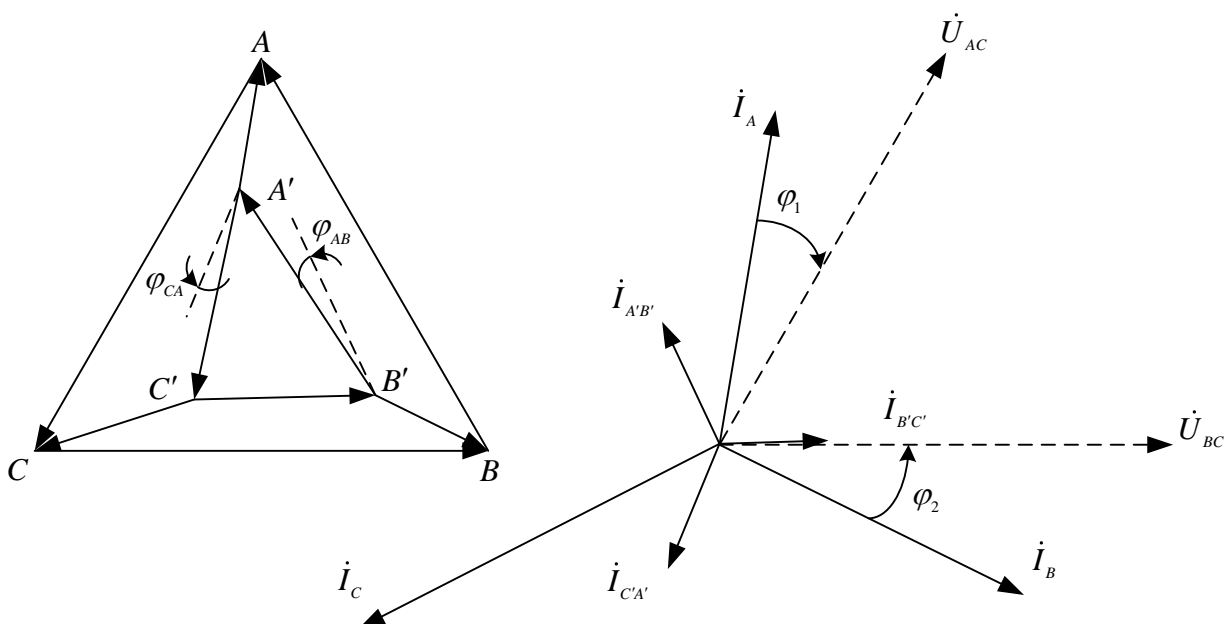


Рис. 32.4

Користуючись вимірами активних потужностей P_1 та P_2 , діючих значень всіх струмів та напруг цього електричного кола, подібну діаграму будують у такій послідовності:

1) У масштабі напруг M_U будують трикутник векторів лінійних напруг джерела, при цьому спочатку горизонтально відкладають вектор U_{BC} потім знаходять положення точки A , роблячи засічки з кінців вектора U_{BC} (з точки B - радіусом який дорівнює U_{AB} , а з точки C - радіусом, що дорівнює у масштабі напрузі U_{CA}).

2) Обчислюють за показом першого ватметра $\cos \varphi_1 = P_1 / U_{AB} I_A$ і сам кут φ_1 . У масштабі M_I з довільної точки малюнку відкладають вектор \dot{I}_A під кутом φ_1 до напруги \dot{U}_{AC} . Подібним чином обчислюють $\cos \varphi_2 = P_2 / U_{BC} I_B$, та кут φ_2 . Вектор струму \dot{I}_B відкладають під кутом φ_2 до напруги \dot{U}_{BC} . Проміжна перевірка виконується за першим законом Кірхгофа побудовою вектора струму \dot{I}_C :

$$\dot{I}_C = -\dot{I}_A - \dot{I}_B. \quad (32.2)$$

Для перевірки порівняємо величину \dot{I}_C із значенням, виміряним під час досліду. Якщо перевірка не виконується, необхідно послідовно змінювати знаки кутів φ_1 та φ_2 до виконання рівняння (32.2).

3) Із точок A, B, C відкладають вектори спадів напруг на проводах лінійних проводів. З'єднуючи точки A', B', C' , одержують вектори напруг навантаження. Таким чином знаходимо напруги $\dot{U}_{A'B'}$, $\dot{U}_{B'C'}$, $\dot{U}_{C'A'}$ на затискачах споживача. Для перевірки правильності побудови діаграми порівнюємо ці напруги з виміряними під час досліду.

4) За першим законом Кірхгофа лінійні та фазні струми зв'язані між собою залежностями:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA}; \quad \dot{I}_B = \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AC}; \quad \dot{I}_C = \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC}. \quad (32.3)$$

Отже, з кінців відповідного вектора лінійного струму радіусами, які дорівнюють значенням фазних струмів приймача $I_{A'B'}$, $I_{B'C'}$, $I_{C'A'}$ робимо засічки, які дають можливість визначити вектори $\dot{I}_{A'B'}$, $\dot{I}_{B'C'}$, $\dot{I}_{C'A'}$. Виз-

начаємо кути зсуву фаз $\varphi_{A'B'}$, $\varphi_{B'C'}$, $\varphi_{C'A'}$ між напругою та струмом на кожному з опорів трикутника навантаження. Ці кути не повинні перевищувати 90 градусів і відповідати характеру підключеного до електричного кола споживача.

Остаточна перевірка розрахунків електричного кола виконується за рівнянням енергетичного балансу.

Питання для самостійної роботи

1. Пояснити, як подати несиметричну систему напруг трьома симетричними складовими.

2. Активну потужність трипровідного трифазного електричного кола звичайно вимірюють двома ватметрами. Визначити, при яких кутах зсуву за фазою симетричного кола:

а) покази ватметрів однакові ($P_1 = P_2$); б) показ $P_1 = 0$;

в) показ $P_2 = 0$; г) $P_1 \leq 0$; д) $P_2 \leq 0$; е) $P_1 = -P_2$.

Література:

6. Теоретичні основи електротехніки: Підручник: У 3 т. / В.С. Бойко, В.В. Бойко, Ю.Ф. Видолоб та ін.; За заг.ред. І.М. Чиженка, В.С. Бойка. – К.: ІВЦ “Видавництво «Політехніка»”, 2004. – Т.1: Усталені режими лінійних електричних кіл із зосередженими параметрами. – С. 191-217.

7. Лінійні електричні кола синусоїдального та періодичного несинусоїдного струму: Навч. посіб./ Щерба А.А., Курило І.А., Кудря Є.А., Намацалюк І.Н., Чибеліс В.І., Перетятко Ю.В. – К.: Лазурит-Поліграф, 2012. – С.113-185

[illegible]

Таблица 32.1

Лабораторна робота №33

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАСИВНОГО ЧОТИРИПОЛЮСНИКА ЗМІННОГО СТРУМУ

Мета роботи:

Оволодіння методикою експериментального дослідження пасивного чотириполюсника змінного струму, визначення параметрів чотириполюсника та перевірка співвідношень, встановлених для цих параметрів.

Підготовка до роботи

Вивчити рекомендовану літературу, ознайомитися з методичними вказівками до роботи, описом лабораторної установки, робочим завданням, підготувати протокол звіту і відповісти на наступні питання:

1. Що називають чотириполюсником ?
2. Який чотириполюсник вважається активним, а який – пасивним ?
3. Які чотириполюсники називаються еквівалентними ?
4. Які чотириполюсники називаються симетричними ?
5. Що розуміють під первинними параметрами чотириполюсника і які співвідношення між ними?
6. Що розуміють під вторинними (характеристичними) параметрами чотириполюсника ?
7. Які досліди необхідно виконати для визначення параметрів чотириполюсника ?
8. Що називають характеристичним опором чотириполюсника та який зв'язок між ним та опорами неробочого ходу і короткого замикання?
9. Що називають сталою передачі чотириполюсника та з яких коефіцієнтів вона складається?
10. Як розраховуються коефіцієнт згасання і коефіцієнт фази ?

Опис лабораторної установки

Джерелом енергії служить одне з джерел блока трифазної напруги навчально-дослідного стенду. Досліджуване електричне коло складається на набірному полі з елементів, вказаних викладачем. Діючі значення напруг та струмів вимірюються за допомогою універсального електронного приладу. Зсув за фазою між напругою та струмом вимірюється електронним фазометром.

Порядок виконання роботи

1. Скласти Т-подібний чотириполусник з підключеними до нього приладами, згідно схеми рис.33.1 Параметри елементів схеми встановлюються за вказівкою викладача.

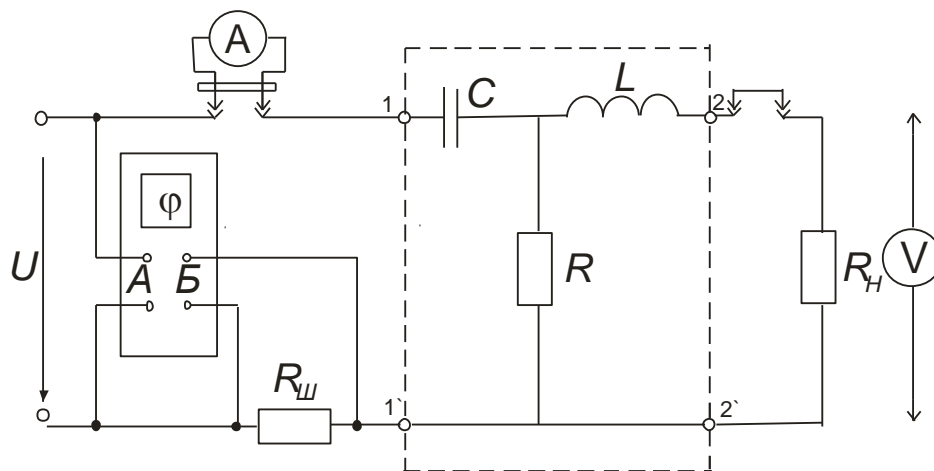


Рис. 33.1

2. Підімкнути електричне коло до джерела енергії синусоїдного струму. Діюче значення вхідної напруги у дослідах обирають за рекомендацією викладача.

3. При живленні з боку вхідних затискачів (1-1'), виконати:

- а) дослід неробочого ходу (до вихідних затискачів 2-2' підімкнути вольтметр) ;
- б) дослід короткого замикання (до затискачів 2-2' підімкнути амперметр);
- в) дослід з навантаженням чотириполусника на активний опір R_H , значення якого задає викладач.

Результати вимірів занести до табл. 33.1.

4. Виконати досліди неробочого ходу та короткого замикання при зворотному підключенні чотириполусника. Результати вимірів за дослідями занести до табл. 33.1

Таблиця 33.1

Режим		U_1 (В)	I_1 (А)	φ_1	U_2 (В)	I_2 (А)
Живлення на вхідних затискачах	Нероб. хід					
	Кор. замик.					
	$Z_n = R_n$					
Живлення на вихідних затискачах	Нероб. хід					
	Кор. замик.					

Обробка результатів експерименту

1. За результатами дослідів обчислити комплексні значення вхідних опорів та перевірити справедливність співвідношення: $\frac{Z_{1o}}{Z_{1к}} = \frac{Z_{2o}}{Z_{2к}}$.

2. Розрахувати, користуючись результатами вимірювань:

а) через співвідношення (33.4) – коефіцієнти A_{11} , A_{12} , A_{21} , A_{22} і перевірити правильність їх розрахунку через співвідношення (33.2);

б) через співвідношення (33.5-33.7) – характеристичні (вторинні) параметри: сталу передачі \underline{G} , сталу згасання A , сталу фази B , характеристичні опори \underline{Z}_{c1} , \underline{Z}_{c2} .

3. Користуючись [4] рівняннями чотириполюсника і визначеними в досліді напругою та струмом навантаження, розрахувати напругу та струм джерела і порівняти їх з дослідними значеннями.

4. Через коефіцієнти чотириполюсника визначити параметри його заступної Π – схеми.

5. Зробити висновки по роботі.

Методичні вказівки

Чотириполюсником називається електротехнічне коло чи його частина, які розглядаються відносно двох пар затискачів. Схематичне зображення чотириполюсника наведене на рис. 33.2.

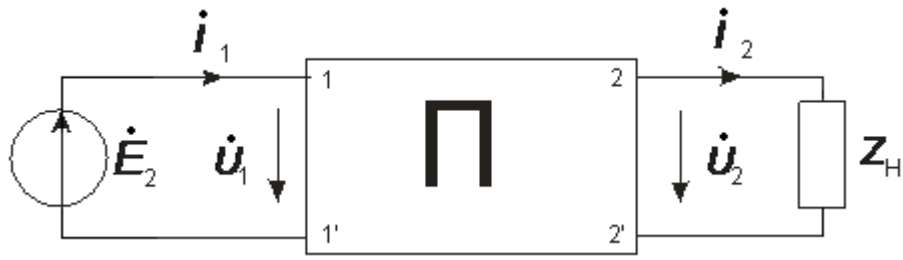


Рис.33.2

Затискачі 1-1' називаються вхідними, а затискачі 2-2' – вихідними. Якщо чотириполюсник складається з лінійних пасивних елементів R , L , C , то він називається пасивним лінійним чотириполюсником. Пасивний чотириполюсник може містити і джерела електричної енергії, але у такому випадку їх дія повинна бути взаємно скомпенсованою. Існують різні форми рівнянь, які зв'язують вхідні і вихідні струми та напруги чотириполюсника. З них рівнянь найчастіше використовують рівняння у формі $[A]$, які відповідають режиму прямої передачі.

При прямому включенні чотириполюсника, коли джерело підімкнене до затискачів 1-1', а навантаження – до затискачів 2-2', та при вказаних на рис.33.2 напрямках струмів і напруг, рівняння чотириполюсника, записані у формі $[A]$, мають вигляд:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \underline{A}_{11}\dot{U}_2 + \underline{A}_{12}\dot{I}_2; \\ \dot{I}_1 &= \underline{A}_{21}\dot{U}_2 + \underline{A}_{22}\dot{I}_2. \end{aligned} \quad (33.1)$$

Сталі комплексні коефіцієнти \underline{A}_{11} , \underline{A}_{12} , \underline{A}_{21} , \underline{A}_{22} називаються первинними параметрами чотириполюсника. Вони характеризують чотириполюсник і залежать тільки від величини активних і реактивних опорів, з яких складається чотириполюсник та схеми їх з'єднання між собою.

Коефіцієнти \underline{A}_{11} та \underline{A}_{22} нерозмірні. Коефіцієнт \underline{A}_{12} вимірюється в омах [Ом], коефіцієнт \underline{A}_{21} – в сіменсах [См].

Коефіцієнти системи рівнянь чотириполюсника у формі $[A]$ зв'язані між собою співвідношенням:

$$\underline{A}_{11}\underline{A}_{22} - \underline{A}_{12}\underline{A}_{21} = 1. \quad (33.2)$$

З наведеного випливає, що тільки три коефіцієнти з чотирьох є незалежними.

При зворотному включенні чотириполюсника, тобто коли джерело підімкнене до затискачів 2-2', а навантаження до затискачів 1-1' (рис.33.3), одержимо іншу систему рівнянь в $[\underline{B}]$ – формі:

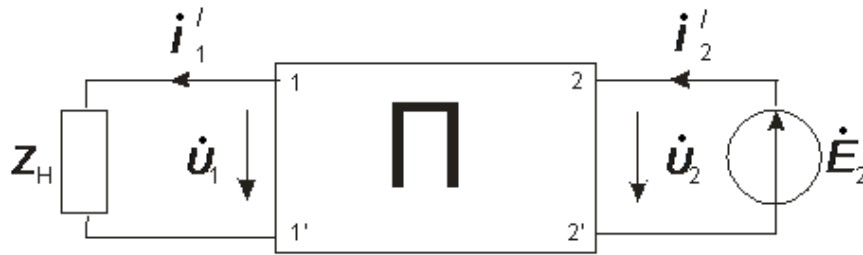


Рис. 33.3

$$\begin{aligned} \dot{U}_2 &= \underline{A}_{22}\dot{U}_1 + \underline{A}_{12}\dot{I}_1'; \\ \dot{I}_2' &= \underline{A}_{21}\dot{U}_1 + \underline{A}_{11}\dot{I}_1'. \end{aligned} \quad (33.3)$$

Зіставляючи системи рівнянь (33.1) та (33.3), бачимо, що коефіцієнти \underline{A}_{11} та \underline{A}_{22} помінялись місцями.

Чотириполюсники, які мають однакові коефіцієнти \underline{A}_{11} , \underline{A}_{12} , \underline{A}_{21} , \underline{A}_{22} , будуть еквівалентними; чотириполюсник, у якого $\underline{A}_{11} = \underline{A}_{22}$, є симетричним.

Складний чотириполюсник з відомими коефіцієнтами, можна замінити еквівалентним чотириполюсником елементарної структури. Такими є Т- та П- подібні схеми заміщення чотириполюсників. Параметри елементів Т - подібної схеми заміщення чотириполюсника (рис. 33.4) обчислюються за формулами:

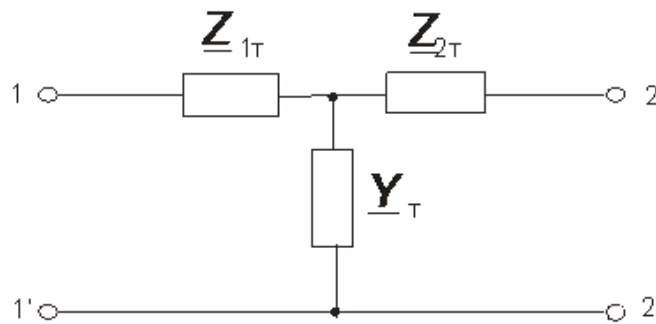


Рис.33.4

$$\underline{Y}_T = \underline{A}_{21}; \quad \underline{Z}_{1T} = \frac{(\underline{A}_{11} - 1)}{\underline{A}_{21}}; \quad \underline{Z}_{2T} = \frac{(\underline{A}_{22} - 1)}{\underline{A}_{21}}.$$

Параметри елементів П- подібної схеми заміщення чотириполюсника (рис. 33.5) обчислюються за іншими формулами:

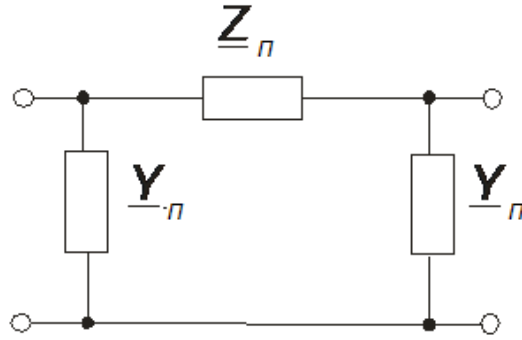


Рис. 33.5

$$\underline{Z}_{\Pi} = \underline{A}_{12}; \quad \underline{Y}_{1\Pi} = \frac{(\underline{A}_{22} - 1)}{\underline{A}_{12}}; \quad \underline{Y}_{2\Pi} = \frac{(\underline{A}_{11} - 1)}{\underline{A}_{12}}.$$

Якщо відомі комплексні значення струмів і напруг на вході і виході чотирьох полюсів чотириполюсника в режимі прямої передачі при неробочому ході ($I_2 = 0$) та короткому замиканні ($U_2 = 0$), первинні параметри обчислюються за наведеними нижче формулами:

$$\underline{A}_{11} = \frac{\dot{U}_{10}}{\dot{U}_{20}}; \quad \underline{A}_{21} = \frac{\dot{I}_{10}}{\dot{U}_{20}}; \quad \underline{A}_{12} = \frac{\dot{U}_{1K}}{\dot{I}_{2K}}; \quad \underline{A}_{22} = \frac{\dot{I}_{1K}}{\dot{I}_{2K}}.$$

Інший спосіб обчислення первинних параметрів чотириполюсника (коефіцієнти \underline{A}_{11} , \underline{A}_{12} , \underline{A}_{21} , \underline{A}_{22}) полягає у попередньому визначенні аналітичним чи дослідним шляхом опорів неробочого ходу (\underline{Z}_o) та короткого замикання (\underline{Z}_κ):

а) $\underline{Z}_{10} = \frac{\dot{U}_{10}}{\dot{I}_{10}} = Z_{10} e^{j\varphi_{10}}$ – живлення відносно затискачів 1-1' при розімкнених затискачах 2-2';

б) $\underline{Z}_{1K} = \frac{\dot{U}_{1K}}{\dot{I}_{1K}} = Z_{1K} e^{j\varphi_{1K}}$ – живлення відносно затискачів 1-1' при короткому замиканні затискачів 2-2';

в) $\underline{Z}_{20} = \frac{\dot{U}_{20}}{\dot{I}_{20}} = Z_{20} e^{j\varphi_{20}}$ – живлення відносно затискачів 2-2' при розімкнених затискачах 1-1';

г) $\underline{Z}_{2K} = \frac{\dot{U}_{2K}}{\dot{I}_{2K}} = Z_{2K} e^{j\varphi_{2K}}$ – живлення відносно затискачів 2-2' при короткому замиканні затискачів 1-1'.

Зазначені опори зв'язані між собою співвідношенням: $\underline{Z}_{10} / \underline{Z}_{1K} = \underline{Z}_{20} / \underline{Z}_{2K}$.

Виходячи з цього, тільки три з них є незалежними.

Тоді:

$$\underline{A}_{11} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_{10}}{(\underline{Z}_{20} - \underline{Z}_{2K})}}; \quad \underline{A}_{12} = \underline{A}_{11} \underline{Z}_{2K}; \quad (33.4)$$

$$\underline{A}_{21} = \frac{\underline{A}_{11}}{\underline{Z}_{10}}; \quad \underline{A}_{22} = \underline{A}_{21} \underline{Z}_{20}.$$

Перевірка виконується за рівнянням (33.2).

Вторинні параметри чотириполюсника характеризують умови проходження сигналу через нього. Тому їх ще називають характеристичними параметрами і визначають за такими формулами:

1) характеристичний опір з боку вхідних затискачів:

$$\underline{Z}_{c1} = \sqrt{\underline{Z}_{10} \underline{Z}_{1K}} = \sqrt{\frac{\underline{A}_{11} \underline{A}_{12}}{\underline{A}_{21} \underline{A}_{22}}} \quad (33.5)$$

2) характеристичний опір з боку вихідних затискачів:

$$\underline{Z}_{c2} = \sqrt{\underline{Z}_{20} \underline{Z}_{2K}} = \sqrt{\frac{\underline{A}_{22} \underline{A}_{12}}{\underline{A}_{21} \underline{A}_{11}}} \quad (33.6)$$

3) коефіцієнт поширення (передачі) чотириполюсника: .

$$\underline{\Gamma} = A + jB = \ln(\sqrt{\underline{A}_{11} \cdot \underline{A}_{22}} + \sqrt{\underline{A}_{12} \cdot \underline{A}_{21}}) \quad (33.7)$$

При прямій передачі режимі узгодженого навантаження при навантаженні чотириполюсника з боку виходу опором \underline{Z}_{c2} , його вхідний опір дорівнює \underline{Z}_{c1} . При зворотній передачі у разі навантаження чотириполюсника з боку затискачів 1-1' опором \underline{Z}_{c1} , його вхідний опір дорівнює \underline{Z}_{c2} .

Коефіцієнт передачі $\underline{\Gamma}$ - комплексне число:

$$\underline{\Gamma} = A + jB,$$

де: A – характеристичний коефіцієнт згасання, який характеризує зміну амплітуди (чи діючого значення) напруг або струмів при проходженні електричної енергії через чотириполіусник. Він вимірюється у неперах $[Hn]$ чи у децибелах $[dB]$;

B – коефіцієнт фази, який характеризує зміну фази напруги або струму при проходженні сигналу через чотириполіусник. Він визначається у радіанах $[rad]$.

Система рівнянь пасивного чотириполіусника може бути записана через його вторинні параметри:

$$\dot{U}_1 = \sqrt{\frac{Z_{c1}}{Z_{c2}}} \cdot (\dot{U}_2 ch \underline{\Gamma} + \dot{I}_2 Z_{c2} sh \underline{\Gamma})$$

$$\dot{I}_1 = \sqrt{\frac{Z_{c2}}{Z_{c1}}} \cdot (\dot{U}_2 \frac{ch \underline{\Gamma}}{Z_{c2}} + \dot{I}_2 sh \underline{\Gamma})$$

Питання для самостійної роботи

1. Методом вольтметра, амперметра та фазометра визначити комплексні значення опорів T -схеми досліджуваного чотириполіусника.
2. Використовуючи \underline{A} – коефіцієнти чотириполіусника, визначити параметри заступної T - схеми чотириполіусника та порівняти їх із значеннями, знайденими в п.1.

Література

8. Теоретичні основи електротехніки: Підручник: У 3 т. / В.С. Бойко, В.В. Бойко, Ю.Ф. Видолоб та ін.; За заг.ред. І.М. Чиженка, В.С. Бойка. – К.: ІВЦ “Видавництво «Політехніка»”, 2004. – Т.1: Усталені режими лінійних електричних кіл із зосередженими параметрами. – С. 219-262.

9. Лінійні електричні кола синусоїдального та періодичного несинусоїдного струму: Навч. посіб./ Щерба А.А., Курило І.А., Кудря Є.А, Намацалюк І.Н., Чибеліс В.І., Перетятко Ю.В. – К.: Лазурит-Поліграф, 2012. – С.85-110.

Лабораторна робота № 35

ДОСЛІДЖЕННЯ СИМЕТРИЧНИХ СКЛАДОВИХ ТРИФАЗНОЇ СИСТЕМИ НАПРУГ

Мета роботи

Дослідити електричні кола, які виконують функції фільтрів симетричних складових прямої, зворотної і нульової послідовностей трифазних несиметричних систем напруг.

Дослідити спеціальні кола, які дозволяють виділити і виміряти окремо кожен симетричний складову системи напруг, створених трифазним джерелом, фази якого з'єднані зіркою.

Підготовка до роботи

Вивчити рекомендовану літературу, ознайомитися з методичними вказівками до роботи, описом лабораторної установки, робочим завданням, підготувати протокол звіту і відповісти на наступні питання:

1. За допомогою яких рівнянь визначаються симетричні складові прямої, зворотної та нульової послідовностей несиметричної трифазної системи напруг?

2. Які рівняння виражають напруги кожної фази трифазної системи напруг через її симетричні складові прямої, зворотної та нульової послідовності?

3. Яким чином можна отримати трифазні системи напруг, зображені на рис. 35.1 а-е ?

4. Довести, що у колі на рис. 35.2 за умови, що $R_1 = R_2$; $R_3 = \sqrt{3}X_C$, вихідна напруга $\dot{U}_{\text{вих}}$ пропорційна симетричній складовій зворотної послідовності \dot{U}_{A2} трифазної системи напруг: $\dot{U}_{\text{вих}} = k\dot{U}_{A2}$.

5. Показати, що помінявши місцями напруги \dot{U}_B і \dot{U}_C у колі на рис. 35.2, отримаємо фільтр (рис. 35.3) прямої послідовності системи фазних напруг $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ з тим же значенням коефіцієнта фільтру: $\dot{U}_{\text{вих}} = k\dot{U}_{A1}$.

6. Довести, що у колі на рис. 35.4 при $R_A = R_B = R_C = R$ напруга $\dot{U}_{\text{вих}}$ на виході пропорційна напрузі нульової послідовності системи фазних напруг $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$, коефіцієнт фільтру $k = 1$: $\dot{U}_{\text{вих}} = \dot{U}_{A0}$.

Опис лабораторної установки

В лабораторній роботі досліджуються різні трифазні системи напруг, яким відповідають векторні діаграми, показані на рис. 35.1, *a-e*.

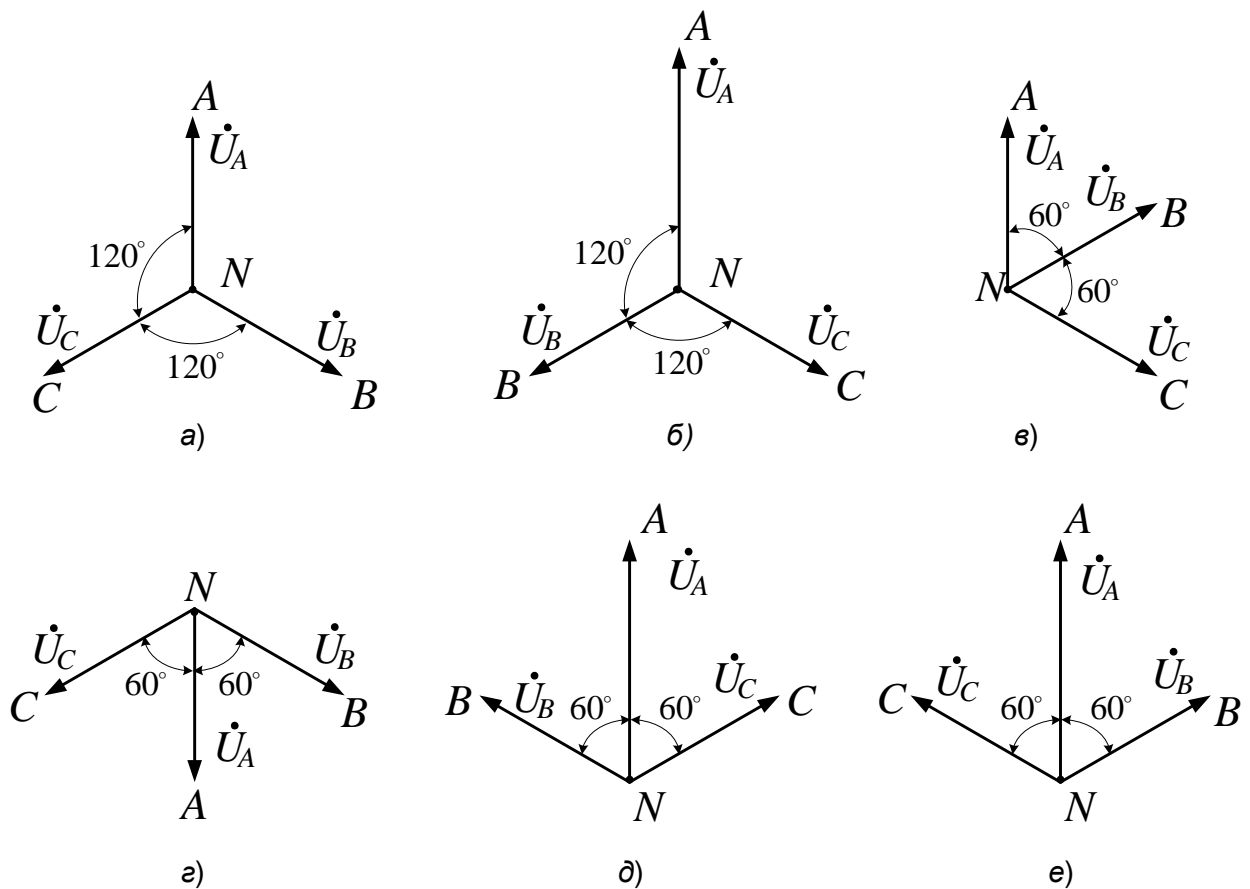


Рис. 35.1

Ці системи утворюються різними способами з'єднання початків і кінців обмоток A, B, C трифазного джерела між вузлами A, B, C і N (рис. 35.2 – 35.4).

Якщо до вузлів A, B, C приєднати початки (позначені маркерами) відповідних обмоток A, B, C , а до вузла N – кінці цих обмоток, то отримаємо систему фазних напруг $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$, яка відповідає векторній діаграмі на рис. 35.1, *a*, тобто:

$$\dot{U}_A = U_A; \quad \dot{U}_B = \dot{U}_B e^{-j120^\circ}; \quad \dot{U}_C = \dot{U}_A e^{+j120^\circ}.$$

У цих виразах приймаємо, що вектор, який зображає напругу фази A , спрямований вздовж осі дійсних величин комплексної площини.

Якщо поміняти місцями початок і кінець обмотки однієї з фаз джерела, то це призведе до того, що вектор відповідної фазної напруги \dot{U}_A, \dot{U}_B чи \dot{U}_C змінить свій напрям на протилежний, тобто відповідний аргумент \dot{U}_A, \dot{U}_B чи \dot{U}_C зміниться на 180° .

Наприклад, якщо поміняти місцями початок і кінець обмотки фази A , то отримана при цьому векторна діаграма системи фазних напруг буде виглядати так, як показано на рис. 35.1, z :

$$\dot{U}_A = U_A e^{j180^\circ}; \quad \dot{U}_B = \dot{U}_B e^{-j120^\circ}; \quad \dot{U}_C = \dot{U}_C e^{+j120^\circ}.$$

Взаємне перейменування будь-якої пари полюсів фаз A, B, C трифазного джерела (рис. 35.2 – 35.4) призводить до зміни на векторній діаграмі взаємного розташування двох відповідних фазних напруг. Наприклад, система, зображена на рис. 35.1, $б$, утворюється з системи, показаної на рис. 35.1, $а$, переміною місць полюсів C і B :

$$\dot{U}_A = U_A; \quad \dot{U}_B = \dot{U}_B e^{+j120^\circ}; \quad \dot{U}_C = \dot{U}_C e^{-j120^\circ}.$$

Подібним чином можна отримати інші трифазні системи напруг, зображені на рис. 35.1. Діючі значення фазних напруг регулюються в межах від нуля до певного максимального значення за допомогою перемикачів у відповідних фазах джерела трифазної напруги.

Для кожної з зображених на рис. 35.1 трифазних систем аналітично і графічно визначаються симетричні складові. Ті ж симетричні складові вимірюються за допомогою фільтрів симетричних складових. Результати обчислень і вимірів порівнюються і робляться відповідні висновки.

Параметри елементів, які використовуються для складання досліджуваних кіл:

1. Діючи значення напруг U_A, U_B, U_C у кожній трифазній системі, показаній на рис. 35.1, $a - e$, задає викладач.

2. $R_1 = R_2 = 200 \text{ Ом}$, $X_C = \frac{1}{\omega C} = 159 \text{ Ом}$, $C = 20 \text{ мкФ}$, $R_3 = 275 \text{ Ом}$.

3. $R_A = R_B = R_C = 200 \text{ Ом}$.

Порядок виконання роботи

1. Занести до табл. 35.1 задані викладачем діючи значення фазних напруг кожної з досліджуваних трифазних систем.

Таблиця 35.1

Система	$U_A, \text{В}$	$U_B, \text{В}$	$U_C, \text{В}$
<i>a</i>			
<i>б</i>			
<i>в</i>			
<i>г</i>			
<i>д</i>			
<i>е</i>			

2. Відповідно до рис. 35.2 скласти електричне коло для визначення симетричної складової зворотної послідовності системи фазних напруг.

3. Для усіх систем 35.1($a \div e$) встановити значення вхідних напруг згідно таблиці 35.1 і виміряти значення вихідних напруг. Занести встановлені та виміряні значення до табл. 35. 2.

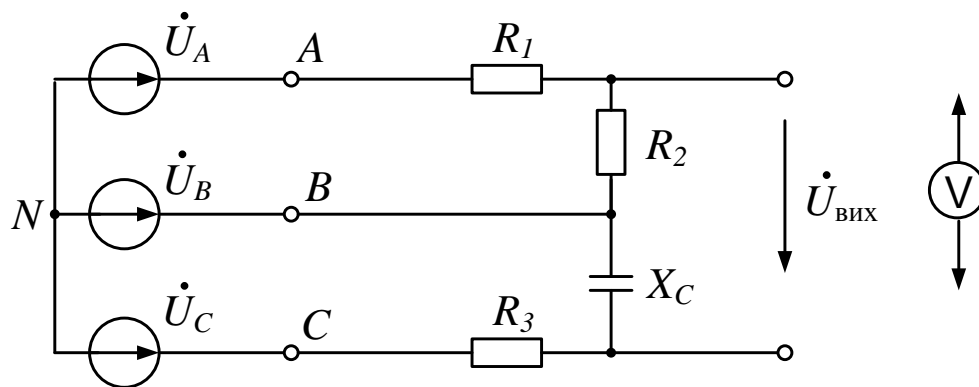


Рис. 35.2

Таблиця 35.2

Система	Вимірювання				Розрахунок	
	$U_A, \text{В}$	$U_B, \text{В}$	$U_C, \text{В}$	$U_{\text{ВИХ}}, \text{В}$	$U_{\text{ВИХ}} / k, \text{В}$	$U_{A2}, \text{В}$
<i>a</i>						
<i>б</i>						
<i>в</i>						
<i>г</i>						
<i>д</i>						
<i>е</i>						

4. Скласти електричне коло, схема якого зображена на рис. 35.3, призначеного для визначення симетричної складової прямої послідовності системи фазних напруг. Для цього у схемі на рис. 35.2 слід поміняти місцями полюси *B* і *C*.

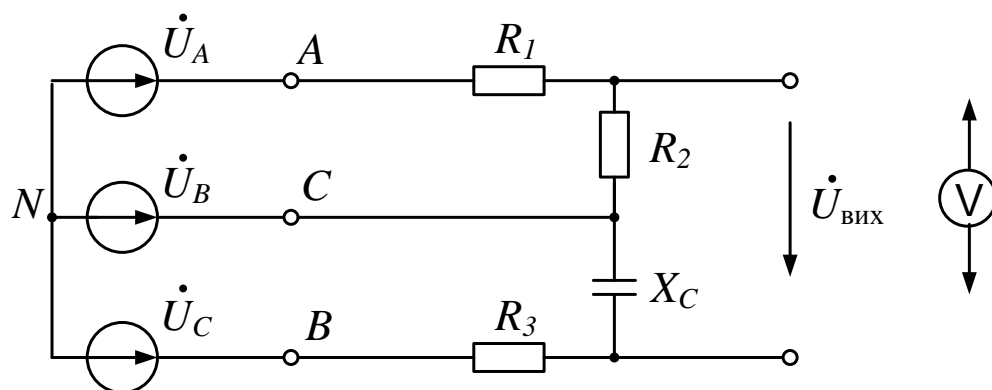


Рис. 35.3

5. Для усіх систем рис. 35.1(*a÷e*) встановити значення вхідних напруг згідно табл. 35.1 і виміряти значення вихідних напруг. Занести встановлені та виміряні значення до табл. 35. 3.

Таблиця 35.3

Система	Вимірювання				Розрахунок	
	$U_A, \text{В}$	$U_B, \text{В}$	$U_C, \text{В}$	$U_{\text{вих}}, \text{В}$	$U_{\text{вих}} / k, \text{В}$	$U_{A1}, \text{В}$
<i>a</i>						
<i>б</i>						
<i>в</i>						
<i>г</i>						
<i>д</i>						
<i>е</i>						

6. Скласти електричне коло, відповідно до зображеної на рис. 35.4 схеми, призначеній для визначення симетричної складової нульової послідовності системи фазних напруг.

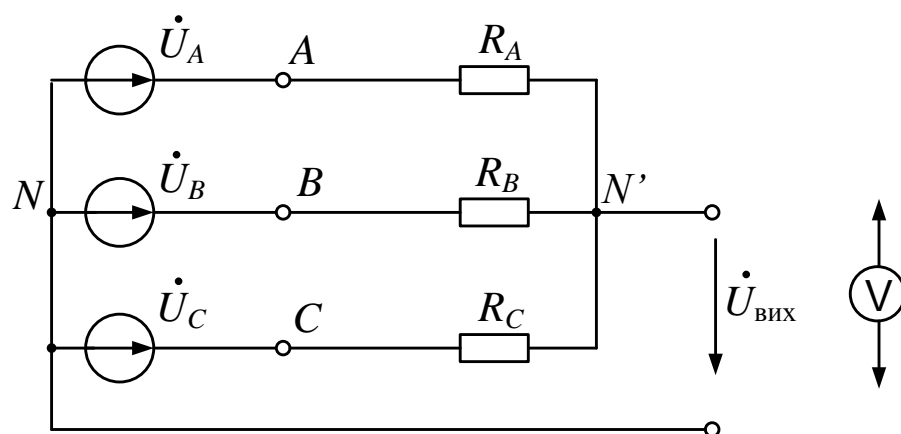


Рис . 35.4

7. Для усіх систем рис. 35.1($a \div e$) встановити значення вхідних напруг згідно табл. 35.1 і виміряти значення вихідних напруг. Занести встановлені та виміряні значення до табл. 35. 4.

Таблиця 35.4

Система	Вимірювання				Розрахунок	
	$U_A, \text{В}$	$U_B, \text{В}$	$U_C, \text{В}$	$U_{\text{вих}}, \text{В}$	$U_{\text{вих}} / k, \text{В}$	$U_0, \text{В}$
<i>a</i>						
<i>б</i>						
<i>в</i>						
<i>г</i>						
<i>д</i>						
<i>е</i>						

Обробка результатів експерименту

1. За даними експериментів, наведеними у табл. 35.2 – 35.4, для кожної системи фазних напруг побудувати векторні діаграми і графічно визначити симетричні складові прямої зворотної і нульової послідовності.

2. Для кожної системи рис. 35.1($a - e$) за даними таблиць 35.2 – 35.4 аналітично визначити симетричні складові прямої, зворотної і нульової послідовності фазних напруг.

3. Порівняти значення симетричних складових систем фазних напруг, отримані експериментально, знайдені графічною побудовою і розраховані теоретично. Зробити висновки.

Методичні вказівки

Метод симетричних складових ґрунтується на поданні будь-якої трифазної несиметричної системи фізичних величин (ЕРС, напруг, струмів і

т. д.) у вигляді суми трьох симетричних систем, які називають симетричними складовими прямої, зворотної та нульової послідовностей.

Будемо розглядати трифазні системи, позначаючи комплексні ЕРС, напруги чи струми кожної з фаз відповідно літерами $\dot{A}, \dot{B}, \dot{C}$. Величини, що стосуються симетричних складових прямої, зворотної та нульової послідовностей, будемо індексувати відповідно символами 1, 2, 0.

Симетричну систему **прямої** послідовності утворюють три однакових за модулем вектори $\dot{A}_1, \dot{B}_1, \dot{C}_1$, зсунуті один відносно одного на кут $2\pi/3$, причому \dot{B}_1 відстає від \dot{A}_1 , а \dot{C}_1 відстає від \dot{B}_1 (рис.35.5, а).

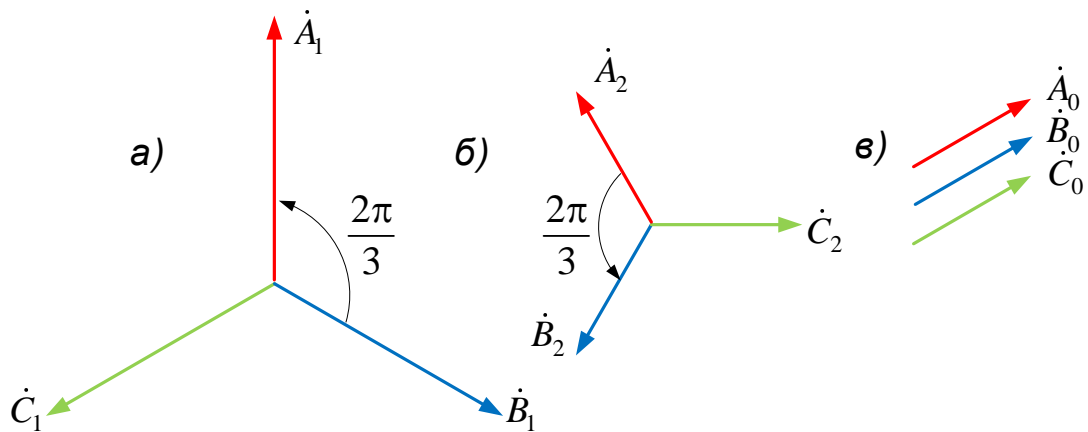


Рис. 5

Симетрична система **зворотної** послідовності утворена однаковими за модулем векторами $\dot{A}_2, \dot{B}_2, \dot{C}_2$ також зсунутими між собою на кут $2\pi/3$, але тепер вектор \dot{C}_2 відстає від \dot{A}_2 , а \dot{B}_2 відстає від \dot{C}_2 (рис.35.5, б).

Симетрична система **нульової** послідовності складається з трьох векторів $\dot{A}_0, \dot{B}_0, \dot{C}_0$, однакових за модулем і фазою (рис.35.5, в).

Користуючись оператором $a = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$ повороту вектора на кут

$2\pi/3$ у додатному напрямі і приймаючи вектори $\dot{A}_1, \dot{A}_2, \dot{A}_0$ за базові, виразимо через них всі інші:

$$\left. \begin{aligned} \dot{B}_1 &= a^2 \dot{A}_1, \quad \dot{B}_2 = a \dot{A}_2, \quad \dot{B}_0 = \dot{A}_0 \\ \dot{C}_1 &= a \dot{A}_1, \quad \dot{C}_2 = a^2 \dot{A}_2, \quad \dot{C}_0 = \dot{A}_0. \end{aligned} \right\} \quad (35.1)$$

Тут враховано, що $a^2 = e^{-j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$.

Легко пересвідчитись, що додавання трьох показаних вище симетричних систем (див. рис. 35.5) дає несиметричну систему векторів $\dot{A}, \dot{B}, \dot{C}$ (рис. 35.6). Кожен вектор цієї системи є сумою трьох векторів – відповідних складових прямої, зворотної та нульової послідовностей.

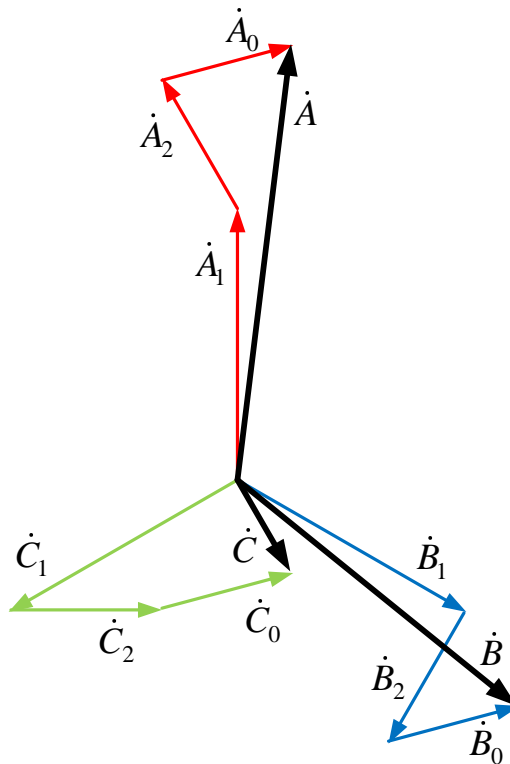


Рис. 35.6

Доведемо, що будь-яка трифазна несиметрична система векторів однозначно розкладається на симетричні складові, тобто:

$$\begin{aligned} \dot{A} &= \dot{A}_1 + \dot{A}_2 + \dot{A}_0, \\ \dot{B} &= \dot{B}_1 + \dot{B}_2 + \dot{B}_0, \\ \dot{C} &= \dot{C}_1 + \dot{C}_2 + \dot{C}_0. \end{aligned} \quad (35.2)$$

Перепишемо ці рівняння, використовуючи співвідношення (35.1):

$$\begin{aligned}\dot{A} &= \dot{A}_1 + \dot{A}_2 + \dot{A}_0, \\ \dot{B} &= a^2 \dot{A}_1 + a \dot{A}_2 + \dot{A}_0, \\ \dot{C} &= a \dot{A}_1 + a^2 \dot{A}_2 + \dot{A}_0.\end{aligned}\tag{35.3}$$

Отримана система трьох рівнянь з трьома невідомими $\dot{A}_1, \dot{A}_2, \dot{A}_0$ розв'язується однозначно. Для визначення \dot{A}_0 знайдемо суму лівих і правих частин рівнянь (35.3). Враховуючи, що $1 + a^2 + a = 0$, отримаємо:

$$\dot{A}_0 = \frac{1}{3}(\dot{A} + \dot{B} + \dot{C}).\tag{35.4}$$

Для визначення \dot{A}_1 знайдемо суму лівих і правих частин рівнянь (35.3), помноживши спочатку друге рівняння на a і третє – на a^2 . В результаті отримаємо:

$$\dot{A}_1 = \frac{1}{3}(\dot{A} + a\dot{B} + a^2\dot{C}).\tag{35.5}$$

Виконавши аналогічну операцію, помноживши спочатку друге рівняння на a^2 і третє – на a , знаходимо \dot{A}_2 :

$$\dot{A}_2 = \frac{1}{3}(\dot{A} + a^2\dot{B} + a\dot{C}).\tag{35.6}$$

З рівняння (35.4) видно, що коли сума векторів несиметричної системи дорівнює нулю, будуть дорівнювати нулю також і вектори нульової послідовності. Отже, *несиметричні системи лінійних напруг і лінійних струмів у разі відсутності нульового проводу містять лише симетричні складові прямої та зворотної послідовності.*

Визначення симетричних складових за виразами (35.4) – (35.6) може бути здійснено графічно. Припустимо, що задана несиметрична система векторів фазних напруг чи струмів (рис. 35.7, а). В кожне з рівнянь (35.4) – (35.6) вектор \dot{A} входить без змін, а вектори \dot{B} та \dot{C} в рівняннях (35.5) і (35.6) повернуті на $\pm 2\pi/3$. Починаємо побудову, відкладаючи вектори $\dot{A}, \dot{B}, \dot{C}$ у такій послідовності, як показано на рис. 35.7, б. Потім повертаємо на кут

$\pm 2\pi/3$ вектор \dot{B} навколо його кінця, що прилягає до початку вектора \dot{A} , і вектор \dot{C} навколо його початку, що прилягає до кінця вектора \dot{A} (див. рис. 35.7, б).

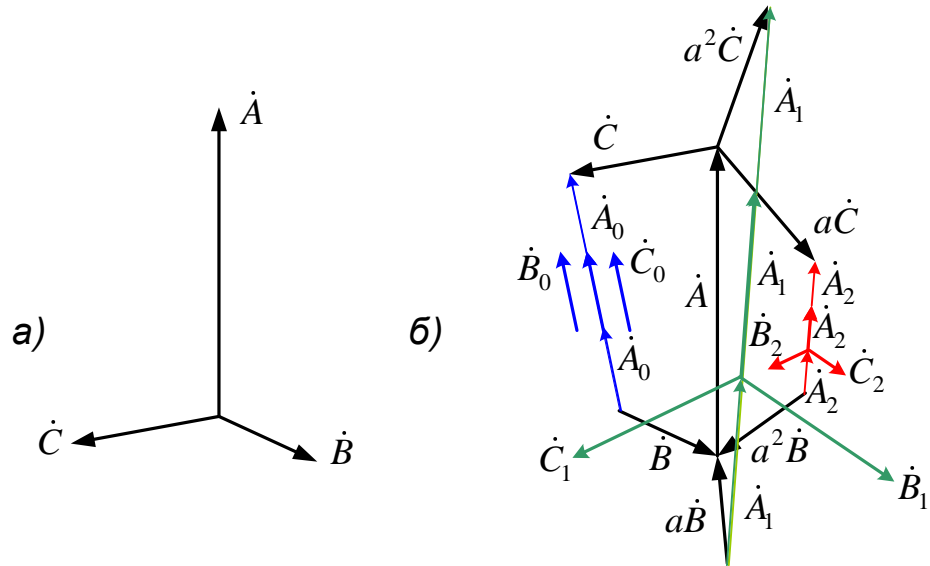


Рис. 35.7

Тепер легко знаходяться суми векторів, які містяться всередині дужок кожного з виразів (35.4) – (35.6) і дорівнюють відповідно $3\dot{A}_0$, $3\dot{A}_1$, $3\dot{A}_2$. Далі очевидною побудовою визначаються всі вектори трьох симетричних систем прямої, зворотної та нульової послідовностей.

Розкладання несиметричної трифазної системи ЕРС на симетричні складові означає еквівалентну заміну ЕРС кожної фази на послідовне з'єднання трьох ЕРС окремих складових. Джерелу несиметричної трифазної системи струмів відповідає паралельне з'єднання трьох джерел окремих симетричних складових у кожній фазі.

Симетричні складові струмів та напруг можна не тільки розрахувати, а і виміряти за допомогою спеціальних вимірювальних схем – фільтрів симетричних складових струмів і напруг. Ці фільтри широко застосовуються в системах захисту електроенергетичних мереж.

Фільтром напруги чи струму симетричних складових називають електричне коло, на вхід якого подають досліджувану несиметричну

трифазну систему напруг чи струмів, а на виході отримують напругу чи струм однієї певної симетричної складової. Фільтри зазвичай складаються з трансформаторів, активних та реактивних опорів, параметри яких підібрані так, щоб пропускати на вихід лише складові бажаної послідовності і не пропускати інших. Отже, якщо на вхід фільтра будь-якої послідовності подані складові інших послідовностей, то напруга чи струм на виході від цих послідовностей повинні дорівнювати нулю.

Наприклад, напруга на виході фільтра напруги зворотної послідовності дорівнюватиме нулю, якщо на вхід подані напруги прямої чи нульової послідовностей. При подачі ж на вхід фільтра напруги зворотної послідовності на його виході з'явиться напруга, значення якої залежить від параметрів фільтра і опору навантаження, ввімкненого між вихідними полюсами.

Розглянемо схему фільтра напруги зворотної послідовності, що досліджується в лабораторній роботі (рис. 35.2) і доведемо, що при

$R_1 = R_2; R_3 = \sqrt{3} \cdot X_C$ напруга на виході кола $\dot{U}_{\text{вих}}$ пропорційна симетричній складовій зворотної послідовності \dot{U}_{A2} системи вхідних фазних напруг $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$. Для цього виразимо симетричну складову зворотної послідовності \dot{U}_{A2} через лінійні напруги несиметричної системи:

$$\begin{aligned}\dot{U}_{A2} &= \frac{1}{3}(\dot{U}_A + a^2\dot{U}_B + a\dot{U}_C) = \frac{1}{3}(\dot{U}_A + a^2\dot{U}_B + a\dot{U}_B - a\dot{U}_B + a\dot{U}_C) = \\ &= \frac{1}{3}[\dot{U}_A + (a^2 + a)\dot{U}_B - a(\dot{U}_B - \dot{U}_C)] = \frac{1}{3}\left[\dot{U}_{AB} + \dot{U}_{BC}e^{-j\frac{\pi}{3}}\right].\end{aligned}$$

Визначимо напругу $\dot{U}_{\text{вих}}$ на виході кола (рис. 35.2) з урахуванням вказаних вище співвідношень між параметрами елементів кола.

$$\dot{U}_{вих} = \frac{1}{2}\dot{U}_{AB} + \frac{\dot{U}_{BC}}{R_3 - jX_C}(-jX_C) = \frac{1}{2}\dot{U}_{AB} + \frac{\dot{U}_{BC}}{1 + j\sqrt{3}} =$$

$$\frac{1}{2}\dot{U}_{AB} + \frac{1}{2}\dot{U}_{BC}e^{-j\frac{\pi}{3}} = \frac{1}{2}\left[\dot{U}_{AB} + \dot{U}_{BC}e^{-j\frac{\pi}{3}}\right].$$

$$\text{Отже, } \dot{U}_{вих} = \frac{3}{2}\dot{U}_{A2}.$$

Таким чином, коло на рис. 2 виконує функцію фільтра зворотної послідовності системи фазних напруг трифазної системи.

Література

1. Теоретичні основи електротехніки: Підручник: у 3-х т./ Бойко В. С., Бойко В. В, Видолоб Ю. Ф. та ін.; за заг. ред. І. М. Чиженка, В. С. Бойка. Т1. Теоретичні основи електротехніки. – К.: ІВЦ "Видавництво «Політехніка»", 2004. – 272 с., [§§ 9.9.2, 9.12].
2. Перхач В.С. Теоретична електротехніка. Лінійні кола: Підручник. – К.: Вища школа, 1992. – 439с., [§ 4.4].
3. Зевеке Г. В., Ионкин П. А., Нетушил А. В., Страхов С.В. Основы теории цепей. – М.: "Энергоатомиздат", 1989. – 528 с., [§§ 11.1 – 11.7].
4. Теоретические основы электротехники: В 3-х т. Учебник для вузов. Том 1. – 4-е изд. / К.С. Демирчян, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин. – СПб.: Питер, 2003. – 463 с., [§§ 7.4, 7.5].

Лабораторна робота № 41

ДОСЛІДЖЕННЯ КОТУШКИ З ФЕРОМАГНІТНИМ ОСЕРДЯМ

Мета роботи

Ознайомлення із впливом режиму роботи котушки з феромагнітним осердям на її еквівалентні параметри. Визначення впливу режиму роботи котушки на величину потужності втрат в міді і сталі. Побудова схеми заміщення котушки з феромагнітним осердям та її векторної діаграми.

Підготовка до роботи

Вивчити рекомендовану літературу, ознайомитися з методичними вказівками до роботи, описом лабораторної установки, робочим завданням, підготувати протокол звіту та відповісти на наступні запитання:

1. Чим зумовлений нелінійний зв'язок між струмом і потокозчепленням у котушці з феромагнітним осердям?
2. Як розподіляється потокозчеплення у котушці з феромагнітним осердям?
3. Що таке індуктивність розсіювання і чому вона лінійно пов'язана зі струмом в котушці?
4. Як визначити напругу U_0 на котушці, що намагнічується?
5. У чому полягає сутність явища гістерезису?
6. Що представляють собою вихрові струми?
7. Які види теплових втрат існують у магнітопроводі котушки, від чого і як вони залежать?
8. Що являє собою кут магнітних втрат у котушці і чим він визначається?
9. Як виглядають схеми заміщення котушки з феромагнітним осердям?
10. Які параметри котушки змінюються зі зміною вхідної напруги?
11. Як будується векторна діаграма котушки з феромагнітним осердям?

Опис лабораторної установки

До складу лабораторної установки входять: котушка з феромагнітним осердям з регульованим повітряним проміжком і двома обмотками; два

вольтметри електромагнітної системи; амперметр електромагнітної системи; ватметр електродинамічної системи; набір неферомагнітних пластин; регульований перетворювач величини змінної напруги (лабораторний автотрансформатор АТ).

Порядок виконання роботи

1. Занести у табл. 41.1 паспортні дані котушки: число витків головної w_1 і додаткової w_2 обмоток, площу перетину осердя S .

Таблиця 41.1

w_1	w_2	S (см ²)
145	145	31,0

2. Скласти електричне коло згідно схеми рис. 41.1.

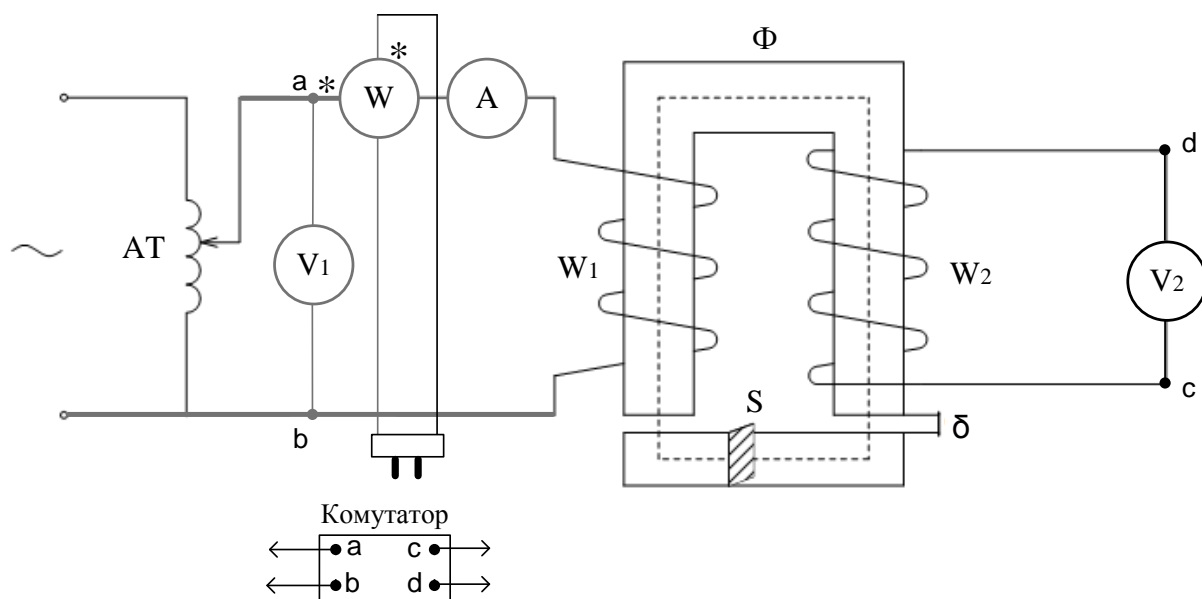


Рис.41.1

3. При незмінній частоті мережі живлення ($f = 50$ Гц) виміряти напругу на головній котушці U_1 , додатковій U_2 , потужності P_1 та P_2 , змінюючи струм у головній котушці в межах 1,0; 1,5...5А при величині повітряного проміжку:

а) $\delta = 0$;

б) $\delta = 2$ мм.

Результати вимірів занести до табл. 41.2.

Таблиця 41.2

Вимір					
δ (мм)	U_1 (В)	I (А)	P_1 (Вт)	U_2 (В)	P_2 (Вт)
$\delta=0$		1,0			
		1,5			
		2,0			
		2.5			
		3,0			
		3.5			
		4,0			
		4.5			
		5,0			
$\delta=2$		1.0			
		1.5			
		2.0			
		2.5			
		3.0			
		3.5			
		4.0			
		4.5			
		5.0			

4. При незмінних напрузі U_2 котушки і частоті мережі f виміряти струм I , потужності P_1 та P_2 , напругу U_1 котушки, змінюючи повітряний проміжок від 1 до 5 мм. Значення U_2 відповідає напрузі, для якої при повітряному проміжку 5 мм амперметр покаже струм $I_A = 5\text{А}$.

Результати вимірів занести до табл. 41.3.

Таблиця 41.3

Вимір					
δ (мм)	U_1 (В)	I (А)	P_1 (Вт)	U_2 (В)	P_2 (Вт)
5					
4					
3					
2					
1					

Обробка результатів експерименту

1. За даними дослідів п.3а і 3б обчислити параметри котушки Z , R , X , Z_0 , R_0 , X_0 , X_s , G_0 , B_0 , I_a , I_p , $\cos\phi$, α ; результати обчислень занести до табл. 41.4. Побудувати залежності $Z=f(U_0)$, $Z_0=f(U_0)$, $R_0=f(U_0)$, $X_0=f(U_0)$, $\cos\phi=f(U_0)$, $I=f(U_0)$.

2. За отриманими даними п.4 обчислити Z , R , X , Z_0 , R_0 , X_0 , $\cos\phi$; результати обчислень занести до табл. 41.5. Побудувати залежності $Z=f(\delta)$, $Z_0=f(\delta)$, $R_0=f(\delta)$, $X_0=f(\delta)$, $I=f(\delta)$, $\cos\phi=f(\delta)$.

Таблиця 41.5

Обчислення									
δ (мм)	Z	R	X	Z_0	R_0	X_0	$\cos\phi$	R_M	X_S
5									
4									
3									
2									
1									

3. Побудувати схему заміщення і векторні діаграми котушки з феромагнітним осердям для одного з дослідів п.3а та 3б.

4. Зробити і записати у протокол звіту висновки з виконаної роботи.

Таблиця 41.4

[illegible]

Методичні вказівки

Котушка з феромагнітним осердям є нелінійним елементом. Це пов'язано з тим, що магнітна проникність (μ) для феромагнетика не є постійною величиною і залежить від значення магнітної індукції в осерді. Нелінійна залежність $B(H)$ задає нелінійну залежність між потокозчепленням Ψ і струмом I , що буде впливати на величину індуктивності котушки з феромагнітним осердям.

На основі другого закону Кірхгофа запишемо:

$$u = Ri + \frac{d\Psi}{dt} = Ri + \frac{d\Psi_s}{dt} + \frac{d\Psi_0}{dt} = Ri + L_s \frac{di}{dt} + w \frac{d\Phi_0}{dt}, \quad (41.1)$$

де: R – активний опір обмотки котушки;

$\Psi = \Psi_s + \Psi_0$ – загальне потокозчеплення, яке складається з основного потокозчеплення Ψ_0 і потокозчеплення розсіювання Ψ_s .

Основне потокозчеплення обумовлене основним магнітним потоком Φ_0 , який замикається по осердю $\Psi_0 = w\Phi_0$, де w – число витків котушки.

Потоки розсіювання замикаються частково в повітрі, зв'язок між потокозчепленням розсіювання і струмом можна вважати лінійним і виразити через співвідношення $\Psi_s = L_s i$, де L_s – індуктивність розсіювання.

Якщо до котушки прикласти синусоїдну напругу, то через нелінійну залежність $\Psi(i)$, форма струму в котушці буде відрізнятися від синусоїдної. Однак, часто, у розрахунках таку несинусоїдну криву замінюють еквівалентною синусоїдною. Метод, заснований на такій заміні, називають методом еквівалентних синусоїд. Сенса такого підходу полягає у тому, що він дозволяє застосовувати для аналізу електромагнітних процесів комплексний метод розрахунку і будувати векторні діаграми.

Представимо рівняння (44.1) у комплексній формі:

$$\dot{U} = Ri + j\omega L_s \dot{I} + \dot{U}_0. \quad (41.2)$$

В останньому виразі напруга $\dot{U}_0 = j\omega\Phi_0$ обумовлена ЕРС самоіндукції, яка створена основним магнітним потоком в феромагнітному осерді. Діюче значення цієї напруги визначається за формулою:

$$U_0 = 4,44 f w \Phi_{0m} = 4,44 f w s B_{0m}.$$

Враховуючи втрати в сталі, можна запропонувати дві еквівалентні схеми заміщення (рис. 41.2) котушки з феромагнітним осердям: послідовну (а) і паралельну (б).

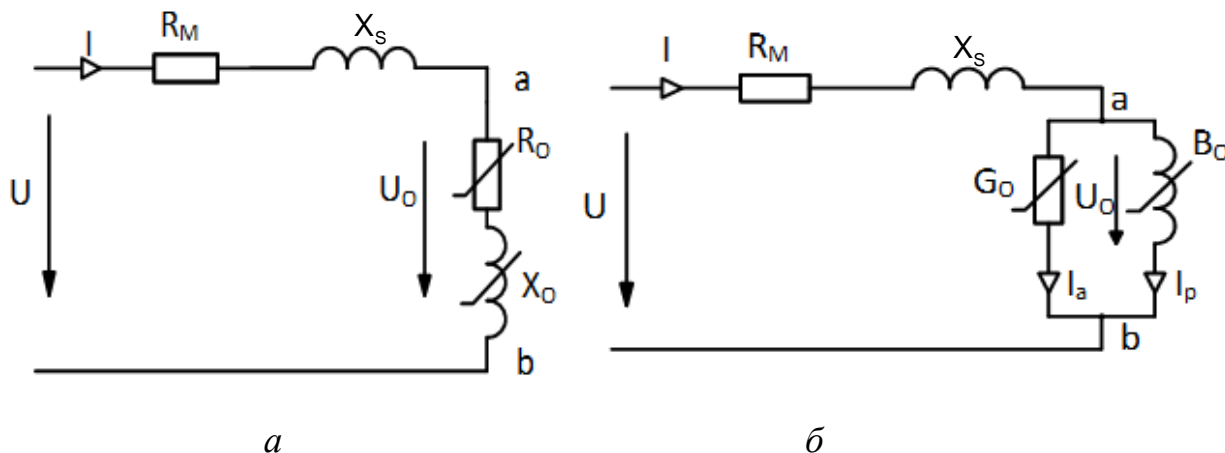


Рис. 41.2

В наведених вище схемах R_M – це активний опір обмотки на низьких частотах, який дорівнює омичному опору, тобто його можна визначити за законом Ома для постійного струму.

Реактивний опір $X_s = \omega L_s$ обумовлений магнітним потоком розсіювання. Активні втрати в осерді (втрати на гістерезис і вихрові струми) враховуються активною нелінійною провідністю G_0 в паралельній схемі, чи активним нелінійним опором R_0 в послідовній схемі заміщення.

Для визначення напруги U_0 , обумовленої основним магнітним потоком в феромагнітному осерді, використовується додаткова обмотка з числом витків w_2 , розміщена на тому ж осерді, що і основна. Вимірявши напругу на затискачах цієї обмотки U_2 і знаючи число витків w_1 і w_2 , можна розрахувати величину напруги U_0 :

$U_0 = \frac{w_1}{w_2} U_2$ та амплітудне значення магнітної індукції

$$B_{0m} = \frac{U_0}{4,44 f w s},$$

де s – площа поперечного перетину феромагнітного осердя котушки.

Оскільки на лабораторній установці $w_1 = w_2$, відповідно $U_0 = U_2$.

Параметри послідовної схеми заміщення котушки визначаються з виразів:

$$Z = U_1 / I; \quad R = P / I^2 \quad \text{чи} \quad R = Z \cos \varphi; \quad X = \sqrt{Z^2 - R^2}; \quad X_s = X - X_0; \quad L_s = X_s / 2\pi f.$$

Коефіцієнт потужності котушки $\cos \varphi = P / U_1 I$.

Для розрахунку параметрів паралельної схеми заміщення котушки використовують наступні розрахункові величини:

$$I_a = P_{cm} / U_0; \quad I_p = \sqrt{I^2 - I_a^2}; \quad \alpha = \arctg(I_a / I_p); \quad G_0 = I_a / U_0; \quad B_0 = I_p / U_0$$

В наведених вище виразах:

Z – повний опір котушки;

R – еквівалентний активний опір котушки;

X – еквівалентний реактивний опір котушки;

$Z_0 = U_0 / I$ – повний нелінійний опір намагнічувального контуру;

$R_0 = P_2 / I^2$ – активний нелінійний опір, обумовлений вихровими струмами і явищем гістерезису;

X_0 – реактивний нелінійний опір, який пов'язаний з процесами в осерді котушки

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2};$$

$$\varphi_0 = \arccos \frac{P_2}{IU_2} - \text{кут зсуву між векторами } U_0 \text{ та } I;$$

φ – кут зсуву між струмом і напругою на вході котушки;

I_a – активна складова струму намагнічування, яка залежить від втрат в сталі осердя;

I_p – реактивна складова струму намагнічування;

G_0 – активна нелінійна провідність, яка враховує втрати в сталі осердя;

B_0 – реактивна провідність, яка відображає основну нелінійну частину індуктивності котушки, пропускаючи струм I_p , що забезпечує створення основного магнітного потоку;

α – кут магнітних втрат або кут зсуву між вектором струму і вектором основного магнітного потоку $\alpha = \frac{\pi}{2} - \varphi_0$.

Пояснюючи характер зміни деяких залежностей, слід пам'ятати, що при зміні напруги мережі живлення U_l чи величини повітряного проміжку осердя δ , опори R_0 і X_0 котушки не будуть залишатися постійними, а отже, буде змінюватися струм, потужність P , повний опір Z , коефіцієнт потужності.

Так, наприклад, при дослідженні котушки при напрузі U , що змінюється, і незмінній частоті змінного струму f , з відомого співвідношення $U = 4,44 f w \Phi_m$ випливає, що максимальний магнітний потік Φ_m залежить від прикладеної до котушки напруги U . Тому втрати в осерді (втрати в сталі) при постійній частоті залежать від прикладеної напруги. Їх можна виразити так $P_{cm} = P_\delta + P_\epsilon$, де P_δ – втрати на вихрові струми, P_ϵ – втрати на гістерезис.

$$\text{Активний опір кола } R = R_{cm} + R_m = \frac{P_\delta + P_\epsilon}{I^2} + R_m = \frac{B_m^2}{I^2} (k_\delta f^2 + k_\epsilon f) + R_m.$$

Як бачимо, при постійній частоті характер зміни активного опору зрештою залежить від співвідношення $(B_m / I)^2$, у якому із збільшенням U максимальна індукція B_m росте спочатку швидше, ніж струм, а потім повільніше. Зазначена залежність зміни активного опору від напруги зображена на рис. 41.3.

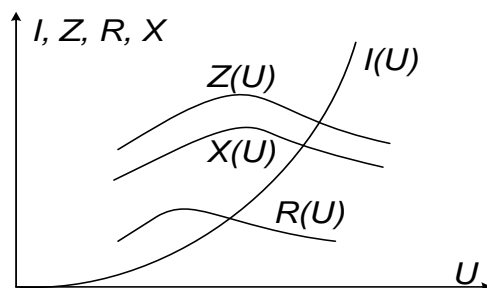


Рис.41.3

Реактивний X і повний опір Z мають характер зміни, подібний до зміни R , і дещо відрізняються лише деяким зсувом максимумів. При побудові графіку залежності $U(I)$ можна переконатися в тому, що він подібний по виду основної кривої намагнічування $B(H)$ (при відсутності повітряного проміжку в осерді).

При зміні повітряного проміжку в осерді і незмінній величині вхідної напруги U_0 , на підставі залежності $U_0 = 4,44 f w \Phi_{0m}$ отримаємо, що при зміні величини зазору максимальна індукція не буде змінюватися, не змінюється й магнітна проникність сталі μ . При цьому магнітний опір кола котушки дорівнює:

$$R_{\text{магн}} = \frac{l}{\mu S} + \frac{\delta}{\mu_0 S}.$$

Як бачимо зі збільшенням зазору магнітний опір росте, а індуктивність

$$L = \frac{w\Phi}{i} = \frac{w}{i} \frac{iw}{R_{\text{магн}}} = \frac{w^2}{R_{\text{магн}}} \quad - \quad \text{зменшується.} \quad \text{Залежність } L(\delta) \text{ близька до}$$

гіперболічної. Оскільки активний опір R_0 котушки значно менший повного Z_0 , тому залежність $Z_0(\delta)$ можна вважати подібною залежності $L(\delta)$.

Характер залежності $\cos \phi = f(\delta)$ виявляється при розгляді виразу

$$\cos \phi = \frac{P_{cm}}{UI} + \frac{P_m}{UI} = \frac{P_{cm}U}{U^2I} + \frac{P_mI}{UI^2} = G_0Z + \frac{R_m}{Z}.$$

Перший доданок зі збільшенням δ зменшується, а другий збільшується. Спочатку, коли Z_0 ще досить велике, переважає перший доданок і зі збільшенням δ $\cos \phi$ зменшується. Надалі переважає другий доданок і $\cos \phi$ збільшується.

Залежності $Z_0(\delta)$ й $\cos \phi(\delta)$ показані на рис. 41.4.

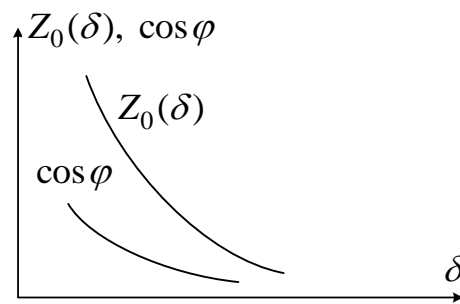


Рис.41.4

Векторна діаграма для паралельної схеми заміщення зображена на рис. 41.5. Побудова починається з вектора основного магнітного потоку Φ_{0m} . Потім під кутом α в бік випередження проводиться вектор струму I , який в свою чергу розкладається на активну і реактивну I_p складові. Напруга U_0 випереджає магнітний потік на кут $\pi/2$. Далі, відповідно рівняння (41.2) будемо падіння напруги на активному опорі обмотки (співпадає зі струмом за напрямком) та спад напруги на індуктивності розсіювання (випереджає струм на кут $\pi/2$). Напруга на затискачах котушки є векторною сумою трьох вказаних напруг.

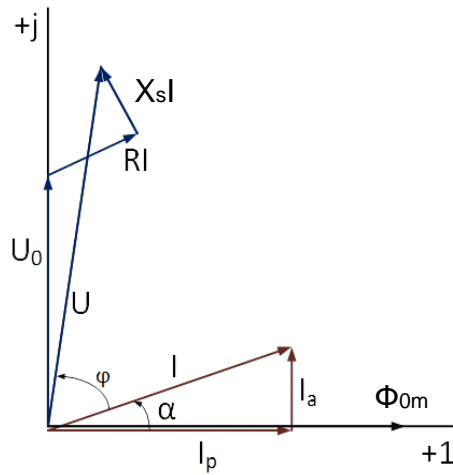


Рис. 41.5.

Питання для самостійної роботи

1. Зняти осцилограму $i(t)$ котушки.
2. Зробити гармонійний аналіз кривої $i(t)$.

Література

1. В.С. Бойко, В.В. Бойко, Ю.Ф. Видолоб, І.А. Курило та ін. Теоретичні основи електротехніки. Т2. Підручник. –Київ, НТУУ «КПІ». 2008. – 224 с.
2. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники, Т2. Учебник. - Л.: Энергоиздат, 1981. - 536 с.
3. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. Основы теории цепей: Учебник. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 528 с.

Лабораторна робота № 42

ДОСЛІДЖЕННЯ ФЕРОРЕЗОНАНСУ НАПРУГ

Мета роботи

Аналіз особливостей фізичної сутності явища ферорезонансу в колі, яке містить послідовно з'єднані котушку з феромагнітним осердям і конденсатор, при живленні його від регульованих джерел напруги і струму та ознайомлення з можливостями практичного застосування ферорезонансу напруг у стабілізаторах напруги.

Підготовка до роботи

Вивчити рекомендовану літературу, ознайомитися з методичними вказівками до роботи, описом лабораторної установки, робочим завданням, підготувати протокол звіту й відповісти на такі питання:

1. У чому полягає умова резонансу напруг?
2. Як можна налаштувати в резонанс контур, складений з послідовно ввімкнених лінійної котушки індуктивності й конденсатора?
3. Які методи застосовують для аналізу процесів у колах змінного струму з нелінійними елементами?
4. У чому полягає явище ферорезонансу напруг?
5. Які допущення приймаються при аналізі процесів у послідовному ферорезонансному колі, що живиться від регульованого джерела напруги або джерела струму?
6. Який вигляд мають вольт-амперні характеристики котушки з феромагнітним осердям і конденсатора з постійною ємністю?
7. Як пов'язана вольт-амперна характеристика котушки з феромагнітним осердям з кривою намагнічування матеріалу осердя?

8. Як побудувати розрахункову вольт-амперну характеристику кола, яке містить послідовно ввімкненні котушку з феромагнітним осердям і конденсатор?
9. Яким чином можна експериментально перевірити розрахункову вольт-амперну характеристику ферорезонансного контуру?
10. Чим пояснюється можливість налаштування послідовного ферорезонансного контуру в резонанс шляхом зміни параметрів джерела живлення?
11. У чому сутність тригерного ефекту й при яких умовах він проявляється в послідовному ферорезонансному контурі?
12. Чому напруга зворотного стрибка відрізняється від напруги прямого стрибка?
13. Як у лабораторних умовах імітувати джерело струму?
14. Яке практичне застосування мають послідовні резонансні контури?

Опис лабораторної установки

Лабораторна установка містить: котушку з феромагнітним осердям; конденсатор; реостат; три вольтметри електромагнітної системи; амперметр електромагнітної системи; фазометр електродинамічної системи; регульований перетворювач змінної напруги (лабораторний автотрансформатор ЛАТР-2).

Порядок виконання роботи

1. Скласти коло відповідно до схеми, зображеної на рис. 42.1. При використанні котушки з затискачами 0-127, 220В, 250 В, підключитися до затискачів 0-127 В, а ємність вибирати в межах 16-18 мкФ.

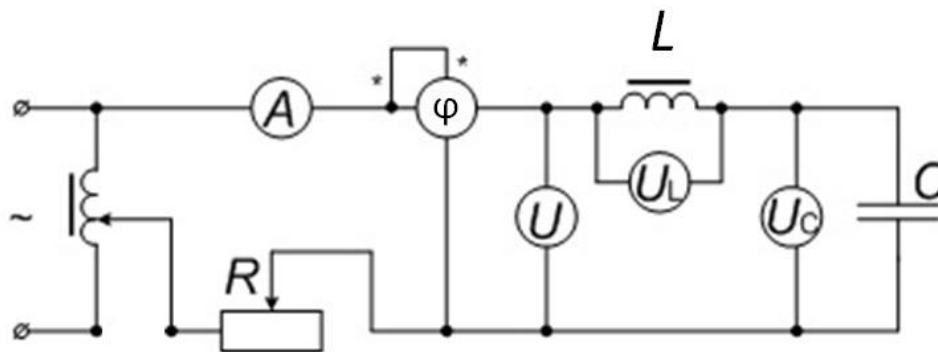


Рис. 42.1

2. Зняти вольт-амперну характеристику послідовного ферорезонансного контуру, його індуктивного і ємнісного елементів при живленні кола від джерела струму, для чого ввести повністю опір реостата, що імітує внутрішній опір джерела живлення, і плавно збільшувати вихідну напругу автотрансформатора. Результати вимірів занести в табл. 42.1.

3. Зняти вольт-амперну характеристику послідовного ферорезонансного контуру, його індуктивного і ємнісного елементів при живленні кола від джерела напруги, для чого опір реостата R повністю вивести і зробити виміри режиму спочатку при плавному збільшенні вихідної напруги автотрансформатора (3-4 значення до стрибка струму в колі та 3-4 значення - після нього), а потім при плавному зменшенні вихідної напруги до нуля. При виконанні досліду зафіксувати значення напруг, при яких відбувається прямий і зворотний стрибки струму. Результати вимірів занести в табл. 42.2.

Обробка результатів експериментів

1. Побудувати в одній координатній системі графіки $U = f_1(I)$, $U_L = f_2(I)$, $U_C = f_3(I)$, $\varphi = f_4(I)$

2. У тій же координатній системі, використовуючи дослідні дані залежностей $U_L = f_2(I)$ і $U_C = f_3(I)$, побудувати ідеалізовану вольт-амперну

характеристику послідовного ферорезонансного контуру. Пояснити причини розбіжності між експериментальною й розрахунковою характеристиками.

3. Використовуючи експериментальну вольт-амперну характеристику послідовного ферорезонансного контуру, визначити значення напруг, при яких у колі буде спостерігатися тригерний ефект, а також визначити величини очікуваних стрибків струму.

4. Використовуючи графіки вольт-амперних характеристик (п.1), визначити ємність конденсатора, при якій напруга тригерного ефекту в 2 рази менша порівняно з напругою в робочій установці.

Таблиця 42.1

№	I, A	U, B	U_L, B	U_C, B	$\varphi, ^\circ$
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					

9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					
16					
17					
18					
19					
20					
21					

5. За даними табл. 42.2 побудувати графіки залежностей $I = \psi_1(U)$, $U_L = \psi_2(U)$, $U_C = \psi_3(U)$, $\varphi = \psi_4(U)$.

Порівняти значення напруг, при яких наступає тригерний ефект, і значення стрибків струмів з результатами розрахунку (п.3).

6. Зробити висновки по роботі.

Таблиця 42.2

№	U , В	I , А	U_L , В	U_C , В	φ , °
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					

Методичні вказівки

У колах з послідовним з'єднанням котушки з феромагнітним осердям і конденсатором (рис.42.2а) плавна зміна напруги джерела живлення може викликати стрибки фази і амплітуди основної гармоніки струму.

Явище зміни знака кута зсуву фаз між основними гармоніками напруги і струму при зміні напруги або струму джерела живлення, яка обумовлена не

лінійністю котушки з феромагнітним осердям, називається ферорезонансом напруг.

У лінійному колі таке явище принципово неможливе.

Як відомо, резонансу напруг у лінійному колі можна домогтися шляхом зміни ємності конденсатора, індуктивності котушки або частоти напруги живлення. На відміну від кіл з постійними параметрами резонанс у розглянутому колі може бути досягнуто шляхом зміни значення прикладеної напруги. Це пояснюється тим, що індуктивність котушки з феромагнітним осердям залежить від значення струму, i , отже, зміниться при зміні напруги всього кола.

Точний аналіз ферорезонансу з урахуванням несинусоїдної форми кривих зробити досить важко, тому зазвичай використовують такі допущення:

1) несинусоїдні напруги і струм заміняють еквівалентними синусоїдами, вибравши їх рівними першим гармонікам дійсних кривих, іншими словами, зневажають наявністю вищих гармонік;

2) конденсатор і котушку з феромагнітним осердям вважають такими, що не мають втрат.

При зазначених умовах напруга на котушці \dot{U}_L випереджає струм i на кут 90° , напруга на конденсаторі \dot{U}_C відстає від струму i на кут 90° , а прикладена напруга $\dot{U} = \dot{U}_L + \dot{U}_C$ (рис.42.2б). Залежність напруги на котушці від струму задана кривою $U_L(I)$, залежність напруги на конденсаторі від струму $U_C(I)$ являє собою похилу пряму, що проходить через початок координат (рис.42.3). Ємність C завжди можна підібрати так, щоб пряма $U_C(I)$ перетинала криву $U_L(I)$. Різниця ординат кривої $U_L(I)$ і прямої $U_C(I)$ дає криву $U'(I)$ яка визначає значення прикладеної напруги при різних значеннях струму. Оскільки діюче значення напруги $U(I)$ - додатна величина, то $U = |U_L - U_C|$ і крива $U(I)$

збігається з кривою $U'(I)$ тільки при значеннях $I < I_0$. При значеннях $I > I_0$ крива $U(I)$ являє собою дзеркальне відображення кривої $U'(I)$ (рис.42.3).

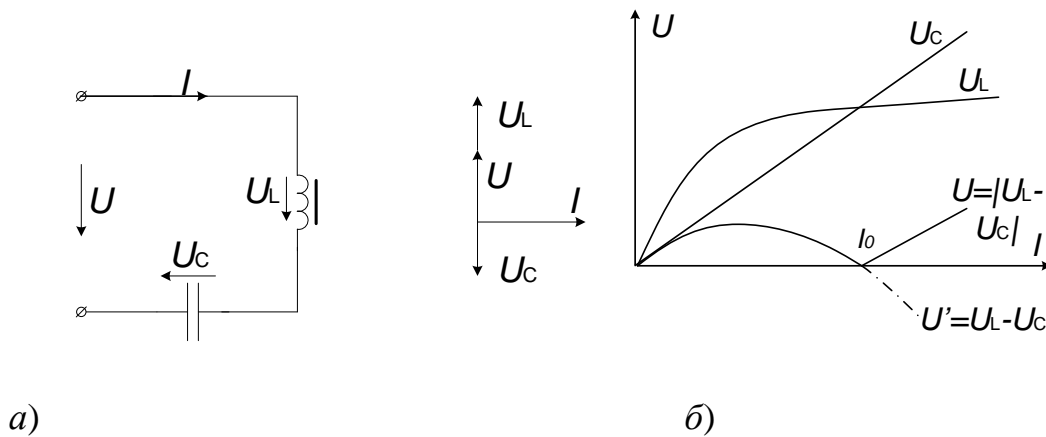


Рис.42.2

Рис.42.3

Особлива точка характеристики $U(I)$, що лежить на осі абсцис (струм I_0), є точкою резонансу, тому що в цій точці напруги U_L та U_C взаємно компенсуються. Кут зсуву за фазою між першими гармоніками напруги і струму в цій точці близький до нуля. Ділянки графіка $U(I)$ поблизу точки I_0 суто теоретичні. Практично через втрати в сталі та в опорі обмоток, а також через наявність вищих гармонік у струмі й напрузі, крива $U(I)$ має трохи інший вигляд (рис.42.4).

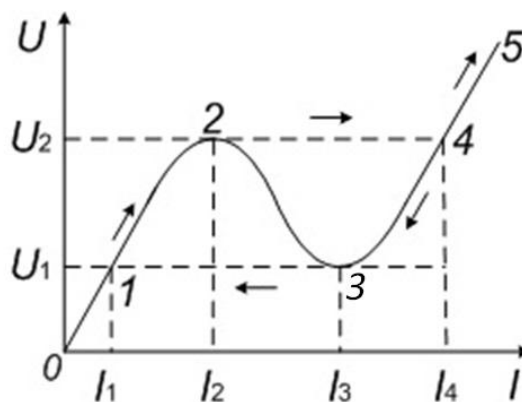


Рис 42. 4

Якщо коло живиться від джерела напруги, то при збільшенні напруги джерела живлення від нуля до значення U_2 (робоча точка на рис.42.4 переміщається від 0 через точку 1 до точки 2), струм за фазою відстає від напруги (кут φ має індуктивний характер).

У точці 2 відбувається стрибок, при якому струм зростає до величини I_4 , тепер за фазою струм випереджає напругу (кут зсуву має ємнісний характер). Подальше зростання напруги викликає плавне збільшення струму. При зменшенні напруги до величини U_3 (робоча точка переміщається від точки 5 через точку 4 до точки 3) струм за фазою випереджає напругу. У точці 3 відбувається стрибкоподібне зменшення струму до значення I_1 , що супроводжується перекиданням фази, кут φ набуває індуктивного характеру.

Явище різкої зміни струму в колі при незначній зміні напруги на вході будемо називати тригерним ефектом у послідовному ферорезонансному колі.

При вмиканні кола до напруги, значення якої перебуває в інтервалі між U_1 і U_2 , у колі встановиться один із двох можливих режимів. Перший режим відповідає положенню робочої точки на ділянці між точками 1 і 2, другий - на ділянці між точками 3 і 4. Те, на якому із двох ділянок виявиться робоча точка залежить від характеру перехідного процесу при вмиканні.

Характеристики $U(I)$ при всіх значеннях струму можна отримати у разі живлення кола від джерела струму.

На рис. 42.5 показані залежності струму і напруг на елементах кола від вхідної напруги. Порівнюючи криві $U_L(U)$ й $U_C(U)$, можна помітити, що при деякому значенні вхідної напруги, яке більше так званої критичної напруги $U_{кр}$, нахил кривої $U_L(U)$ набагато менший, ніж нахил кривої $U_C(U)$.

Малий нахил характеристики $U_L(U)$ в області більших насичень сталі дозволяють здійснити ферорезонансні стабілізатори напруги. Схема найпростішого стабілізатора показана на рис.42.6.

Визначивши для ряду значень вхідної напруги U_1 відповідні значення вихідної напруги U_2 , можна встановити значення $U_1 = U_{кр}$ при перевищенні яких починають проявлятися стабілізуючі властивості кола. Коефіцієнт стабілізації при цьому визначається формулою

$$k_{CT} = \frac{\Delta U_1}{U_1} : \frac{\Delta U_2}{U_2},$$

де $\Delta U_1, \Delta U_2$ - зміна напруги відповідно на вході кола і при навантаженні.

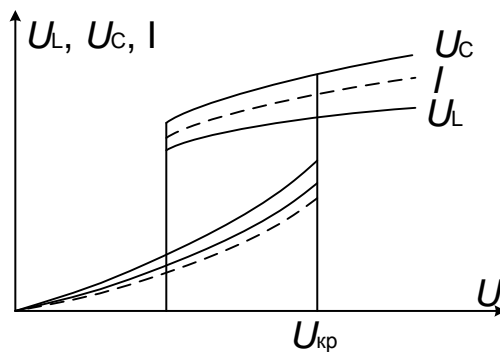


Рис. 42.5

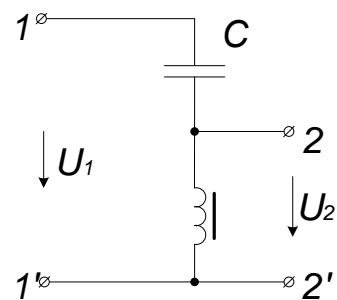


Рис. 42.6

Сутність явища стабілізації в такому колі полягає в наступному. Зі збільшенням напруги живлення струм у колі різко зростає; збільшення струму призводить до зменшення індуктивності котушки з феромагнітним осердям, у той час як ємність конденсатора залишається незмінною. Таким чином, відносна зміна напруги на котушці виявляється значно меншою, ніж на вході кола.

Замість конденсатора можуть бути використані реостат або лінійна котушка, однак стабілізація при цьому погіршиться, тому що струм у колі буде меншим і, отже, насичення сталі осердя не настільки великим, як у випадку застосування конденсатора. Очевидно, що стабілізація буде тим кращою, чим більше насичення, тобто чим більш пологою буде кінцева частина характеристики котушки.

При вмиканні навантаження утворюється гілка, паралельна котушці з феромагнітним осердям, у результаті чого струм в останній зменшується, і, отже, погіршуються стабілізуючі властивості кола.

До недоліків феромагнітних стабілізаторів напруги також варто віднести несинусоїдність форми вихідної напруги й залежність стабілізуючих властивостей від частоти.

Питання для самостійної роботи

1. Скласти схему найпростішого ферорезонансного стабілізатора напруг.
2. Визначити критичну напругу $U_{кр}$ для даного стабілізатора.
3. Розрахувати значення коефіцієнта стабілізації $k_{ст}$ в режимі неробочого ходу і у навантажувальному режимі (як навантаження використати реостат).
4. Замість конденсатора ввімкнути в коло реостат, опір якого $|R| = |Z_c|$, потім замінити реостат котушкою без осердя, дотримуючи $|Z_L| = |Z_c|$. З'ясувати, як впливає значення і характер опору навантаження на ефект стабілізації. Результати дослідів порівняти з результатами, отриманими в п.3.

Література

1. В.С. Бойко, В.В. Бойко, Ю.Ф. Видолоб, І.А. Курило та ін. Теоретичні основи електротехніки. Т2. Підручник. –Київ, НТУУ «КПІ». 2008. – 224 с.
2. Перхач В.С. Теоретична електротехніка: Лінійні кола: Підручник. К: Вища школа., 1992. - 439 с.
3. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники, Т1. Учебник. - Л.: Энергоиздат, 1981. - 536 с.
4. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. Основы теории цепей: Учебник. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 528 с.

5. Курило И. А., Толпыго О. Б. Нелинейные электрические цепи и методы их анализа. - Киев.: КПИ, 1979. - 140 с.

Лабораторна робота № 43

ДОСЛІДЖЕННЯ ФЕРОРЕЗОНАНСУ СТРУМІВ

Мета роботи

Аналіз особливостей фізичної сутності явища ферорезонансу в колі, що містить паралельно з'єднані котушку з феромагнітним осердям і конденсатор, при живленні його від регульованих джерел напруги й струму та ознайомлення з можливостями практичного застосування явища ферорезонансу струмів у стабілізаторах напруги.

Підготовка до роботи

Вивчити рекомендовану літературу, ознайомитися з методичними вказівками, описом лабораторної установки, робочим завданням, підготувати протокол звіту й відповісти на такі питання:

1. У чому полягає умова резонансу струмів?
2. Як можна налаштувати в резонанс контур, складений з паралельно ввімкнених лінійної котушки індуктивності й конденсатора?
3. Які методи застосовують для аналізу процесів у колах змінного струму з нелінійними елементами?
4. У чому полягає явище ферорезонансу струмів?
5. Які допущення приймаються при аналізі процесів у паралельному ферорезонансному колі, яке живиться від джерела напруги й від джерела струму?

6. Як виглядають вольт-амперні характеристики котушки з феромагнітним осердям і конденсатора з постійною ємністю?
7. Як будується розрахункова вольт-амперна характеристика кола, що містить паралельно ввімкнену котушку з феромагнітним осердям і конденсатор?
8. Яким чином можна експериментально перевірити розрахункову вольт-амперну характеристику ферорезонансного контуру?
9. Чим пояснюється можливість налаштування паралельного ферорезонансного контуру в резонанс шляхом зміни параметрів джерела живлення?
10. У чому полягає сутність тригерного ефекту й за яких умов він проявляється в паралельному ферорезонансному контурі?
11. Чому струм зворотного стрибка напруги відрізняється від струму прямого стрибка?
12. Як у лабораторних умовах імітувати джерело струму?
13. Яке практичне застосування паралельних ферорезонансних контурів?

Опис лабораторної установки

Лабораторна установка містить: котушку з феромагнітним осердям; конденсатор; блок, що включає в себе окремий паралельний ферорезонансний контур і послідовно з'єднаний з ним резистор, який виконує функції внутрішнього опору джерела живлення; три амперметри електромагнітної системи; вольтметр електромагнітної системи; вольтметр типу Ф4313; фазометр електродинамічної системи; регульований перетворювач величини змінної напруги (лабораторний автотрансформатор ЛАТР-2).

Порядок виконання роботи

1. Скласти коло відповідно до схеми рис. 43.1.

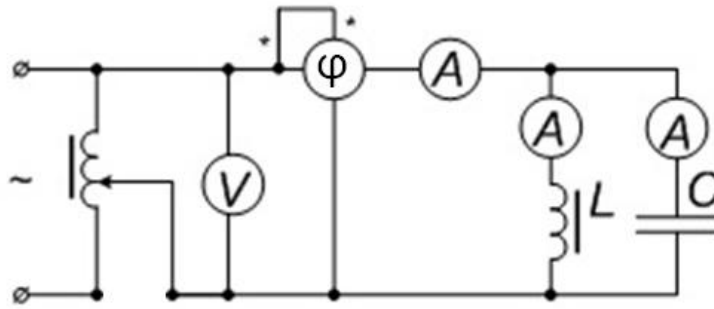


Рис. 43.1

2. Зняти вольт-амперні характеристики: кола, його індуктивної і ємнісної вітки, плавно збільшуючи вхідну напругу від нуля до 130 В. Результати вимірів занести до табл. 43.1.

Таблиця 43.1

№	$U, \text{В}$	$I, \text{А}$	$I_L, \text{А}$	$I_C, \text{А}$	$\varphi, ^\circ$
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					

3. Скласти коло відповідно до схеми рис. 43.2, використовуючи при цьому блок з окремим ферорезонансним контуром і додатковим резистором.

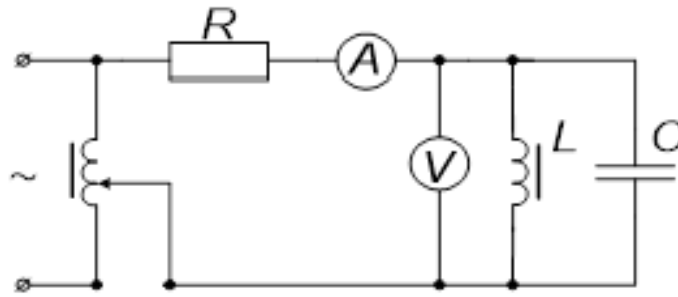


Рис. 43.2

4. Зняти вольт-амперні характеристики паралельного ферорезонансного контуру при плавному збільшенні струму джерела живлення від нуля до 100 мА та при плавному зменшенні його від 100 мА до нуля. Результати вимірів занести до табл.43.2.

Таблиця 43.2

№	U , В	I , А
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		

Обробка результатів експериментів

1. Побудувати в одній координатній системі вольт-амперні характеристики:

а) конденсатора $I_C = f_1(U)$;

б) котушки з феромагнітним осердям $I_L = f_2(U)$;

в) паралельного ферорезонансного контуру $I = f_3(U)$.

2. У тій же системі координат побудувати ідеалізовану вольт-амперну характеристику контуру за вольт-амперними характеристиками $I_L = f_2(U)$ і $I_C = f_1(U)$, зневажаючи активними втратами і вищими гармонійними складовими струму.

3. Порівняти вольт-амперні характеристики, наведені в п.1 і в п.2.

4. Побудувати вольт-амперну характеристику кола за даними дослідів в п.4 з порядку виконання роботи. Пояснити характер зміни напруги на контурі при зміні струму джерела живлення.

5. Зробити висновки по роботі.

Методичні вказівки

Котушка з феромагнітним осердям є нелінійним елементом. Крива намагнічування матеріалу осердя має вигляд, показаний на рис.43.3.

Якщо змінити масштаб по осі B в S разів (S - площа поперечного перетину магнітопроводу), а по осі H в l раз (l - довжина середньої лінії магнітопроводу), то ця ж крива може розглядатися як вебер-амперна характеристика котушки з феромагнітним осердям $\Phi = f(I)$; $BS = \Phi$; $Hl = Iw$ (w - число витків котушки).

Нелінійний зв'язок між потоком і струмом говорить про те, що індуктивність котушки з феромагнітним осердям не є постійною величиною. Магнітний потік Φ і напруга на затискачах котушки, у якої відсутні активні втрати, зв'язані співвідношенням $U = 4,44 f_w \Phi_m$.

Якщо котушку з феромагнітним осердям і конденсатор з'єднаємо паралельно, то в складеному контурі при плавній зміні напруги може мати місце резонанс, внаслідок взаємної компенсації реактивних складових струмів котушки й конденсатора. Це явище одержало назву ферорезонансу струмів.

У вітці, що містить котушку з феромагнітним осердям, при синусоїдній напрузі джерела живлення струм буде несинусоїдним. У вітці з конденсатором він змінюється за синусоїдним законом з частотою джерела живлення. Тому резонансний режим можливий для тієї ж частоти.

Для досягнення ферорезонансу на основній гармоніці струму котушки і конденсатора, необхідно, щоб вольт-амперні характеристики котушки з феромагнітним осердям і конденсатора перетиналися.

Якщо припустити, що струм у котушці синусоїдний і в паралельному ферорезонансному контурі відсутні активні втрати, вольт-амперні характеристики для кола рис. 43.1 і його індуктивної і ємнісної вітки будуть мати вигляд, показаний на рис.43.4. Точка *a* відповідає резонансу струмів.

У дійсності, в результаті наявності вищих гармонік у струмі котушки, а також активних втрат у колі, вольт-амперна характеристика всього кола буде мати вигляд, зображений на рис.43.5.

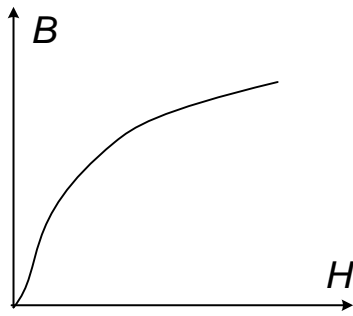


Рис.43.3

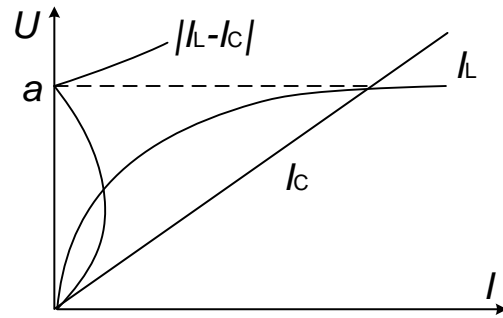


Рис.43.4

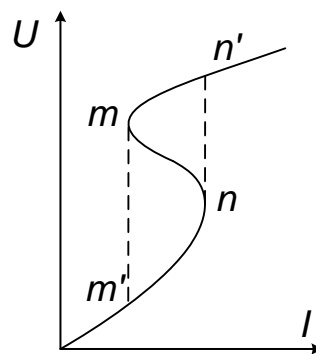


Рис.43.5

Якщо паралельний ферорезонансний контур живити від джерела струму, то при плавному збільшенні струму спостерігаються стрибки напруги (із точки n у точку n'). При зменшенні струму напруга стрибком зміниться від величини, що характеризується точкою m , у точку m' .

Стрибкоподібні зміни напруги на контурі при зміні струму джерела живлення, що супроводжуються зміною знаку кута зсуву за фазою між основними гармоніками струму і напруги в колі, отримали назву тригерного ефекту.

Питання для самостійної роботи

1. Скласти коло стабілізатора напруги, який містить паралельний ферорезонансний контур, відповідно до схеми рис. 43.6.

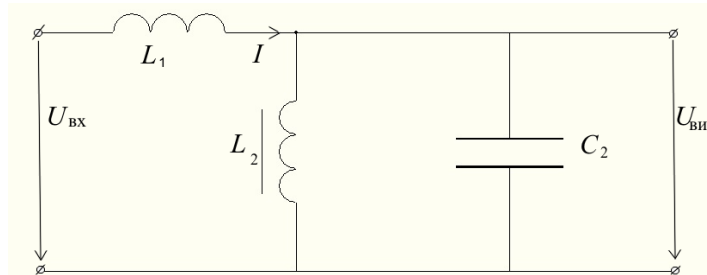


Рис.43.6

2. Зняти характеристику $U_{вих} = f(U_{вх})$ ненавантаженого стабілізатора, побудувати її графік і по ньому визначити критичне значення вхідної напруги $U_{кр}$, з якого починає проявлятися ефект стабілізації. Визначити коефіцієнт стабілізації.

3. Підімкнути до виходу стабілізатора активне навантаження і для двох-трьох значень R зняти характеристику $U_{вих} = f(U_{вх})$; обчислити коефіцієнт стабілізації. Порівняти результати дослідів і розрахунків, проведених в пп.3 і 4 і зробити висновки.

Література

1. В.С. Бойко, В.В. Бойко, Ю.Ф. Видолоб, І.А. Курило та ін. Теоретичні основи електротехніки. Т2. Підручник. –Київ, НТУУ «КПІ». 2008. – 224 с.

2. Перхач В.С. Теоретична електротехніка: Лінійні кола: Підручник. К: Вища школа., 1992. - 439 с.

3. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники, Т1. Учебник. - Л.: Энергоиздат, 1981. - 536 с.

4. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. Основы теории цепей: Учебник. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 528 с.

5. Курило И. А., Толпыго О. Б. Нелинейные электрические цепи и методы их анализа. - Киев.: КПИ, 1979. - 140 с.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 44

ДОСЛІДЖЕННЯ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА З ФЕРОМАГНІТНИМ ОСЕРДЯМ

Мета роботи

Ознайомитися з улаштуванням однофазного двообмоткового трансформатора з феромагнітним осердям, дослідити режими його роботи з активним, активно-індуктивним і ємнісним навантаженнями, а також навчитися за дослідними даними визначати параметри елементів схеми заміщення. Побудова векторних діаграм трансформатора, які відповідають різним режимам його роботи.

Підготовка до роботи

Вивчити рекомендовану літературу, ознайомитися з методичними вказівками, описом лабораторної установки, робочим завданням, підготувати протокол звіту і відповісти на наступні питання:

1. Як улаштований однофазний трансформатор з феромагнітним осердям?
2. Яке призначення трансформаторів?
3. Які параметри елементів схеми заміщення трансформатора визначають з досліду неробочого ходу?
4. Які параметри елементів схеми заміщення трансформатора визначають з досліду короткого замикання?
5. Які струми і напруги необхідно встановлювати в первинному і вторинному колах трансформатора в дослідах неробочого ходу та короткого замикання?
6. Довести, що в досліді неробочого ходу трансформатора активні втрати в опорах обмоток настільки малі, що ними можна знехтувати порівняно з втратами в феромагнітному осерді.
7. Довести, що в досліді короткого замикання трансформатора активні втрати в сталі осердя настільки малі, що ними можна знехтувати порівняно з втратами в обмотках.

8. З якою метою вторинні обмотки трансформаторів зводять до числа витків первинних? Яка умова повинна виконуватися при такому зведенні?

9. Чи може напруга на вторинних затискачах трансформатора перевищувати ЕРС вторинної обмотки? Як впливає на цю напругу характер навантаження?

10. Чи може струм у первинній обмотці навантаженого трансформатора бути меншим від струму неробочого ходу? Як впливає на значення цього струму характер опору навантаження?

11. Як виглядає схема заміщення трансформатора в режимі неробочого ходу? Якому іншому електротехнічному пристрою відповідає така ж схема заміщення? Як побудувати векторну діаграму в режимі неробочого ходу?

12. Як побудувати векторну діаграму трансформатора за дослідними даними режиму короткого замикання?

Опис лабораторної установки

До складу лабораторної установки входять: однофазний двообмотковий трансформатор з феромагнітним осердям; два вольтметри електромагнітної системи; два амперметри електромагнітної системи; два ватметри електродинамічної системи; лабораторний регульований автотрансформатор; набір навантажень: повзунковий дровотий лабораторний реостат, конденсатор і котушки індуктивності.

Як джерело живлення використовується силова мережа з напругою 220В.

Порядок виконання роботи

1. Відповідно до схеми рис.44.1 скласти електричне коло, призначене для дослідження роботи трансформатора у режимі неробочого ходу.

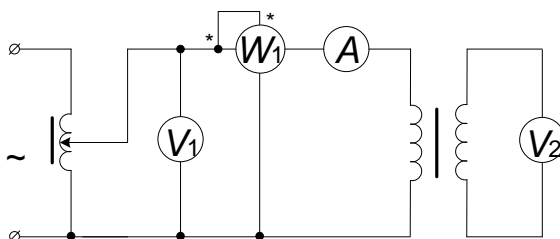


Рис.44.1

2. Виконати дослід неробочого ходу трансформатора. Первинна обмотка трансформатора включається під регульовану автотрансформатором напругу U_1 , змінюючи яку, напругу вторинної обмотки досліджуваного трансформатора U_2 необхідно довести до номінального значення, яке наведене у паспорті трансформатора. У цьому режимі у первинному колі вимірюються: потужність P_{10} , струм I_{10} та напруга U_{10} , а у вторинному – напруга U_{20} .

Результати вимірів заносяться до табл. 44.1.

Таблиця 44.1

Дослід	$U_1, \text{В}$	$I_1, \text{А}$	$P_1, \text{Вт}$	$U_2, \text{В}$	$I_2, \text{А}$	$P_2, \text{Вт}$
Неробочий хід						
Коротке замикання						
Активне навантаження						
Індуктивне навантаження						
Ємнісне навантаження						

3. Відключити в електричному колі (рис. 44.1) вольтметр V_2 і замість нього включити амперметр. Отримане при цьому коло призначене для дослідження роботи трансформатора у режимі короткого замикання.

4. Виконати дослід короткого замикання трансформатора. Звертаємо особливу увагу, що у режимі короткого замикання трансформатора прикладати до його первинної обмотки номінальну напругу, як це мало місце у досліді неробочого ходу, **не можна**. У досліді короткого замикання до первинної обмотки трансформатора подається занижена, регульована автотрансформатором напруга, змінюючи яку, доводять струм у замкненому через амперметр вторинному колі досліджуваного трансформатора до номінального. Його значення наведене у паспорті трансформатора.. Після цього у первинному колі слід виміряти: потужність $P_{1К}$, напругу $U_{1К}$ і струм $I_{1К}$, а у вторинному – струм $I_{2К}$.

Результати вимірів заносяться до табл.44.1.

5. Скласти електричне коло відповідно до схеми рис.44.2.

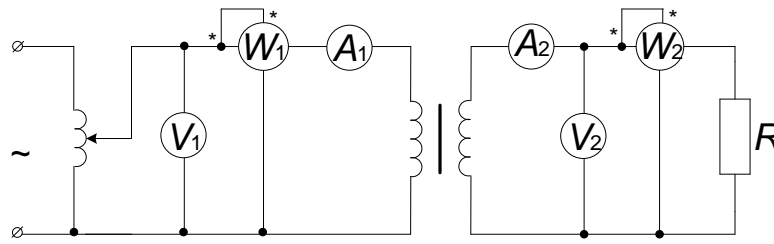


Рис.44.2

6. При прикладеній до трансформатора номінальній первинній напрузі вимірити струм, напругу і активну потужність у первинному і вторинному колах, підключаючи по черзі до вихідних затискачів трансформатора: а) реостат; б) котушку індуктивності; в) конденсатор.

Результати вимірів занести до табл.44.1.

Обробка результатів експериментів

1. Намалювати схему заміщення трансформатора й обчислити всі параметри її за даними дослідів п.2 і 4. Усі розрахунки мають бути наведеними у звіті по лабораторній роботі.

2. Для кожного з досліджених режимів роботи трансформатора побудувати його векторну діаграму.

3. Зробити висновки по роботі.

Методичні вказівки

Трансформатором називають статичний електромагнітний пристрій, що має дві або більше число індуктивно зв'язаних обмоток і призначений для перетворення змінних напруг і струмів однієї величини в змінні напруги і струми іншої величини.

У техніці здебільшого застосовують трансформатори, обмотки яких розташовані на спільному осерді із спеціальної трансформаторної сталі.

Нелінійний характер магнітного кола ускладнює вивчення трансформаторів зі сталевим осердям. З припустимою похибкою магнітне поле трансформатора може бути представлено еквівалентною картиною у виді трьох потоків:

- 1) основний магнітний потік Φ_0 - потік, створюваний магніторухливими силами (МРС) обох обмоток, який замикається по феромагнітному осерддю, охоплюючи усі витки обмоток трансформатора;
- 2) потік розсіювання Φ_{1s} , зчеплений з усіма витками первинної обмотки;
- 3) потік розсіювання Φ_{2s} , зчеплений з усіма витками вторинної обмотки.

Потоки розсіювання замикаються головним чином через повітря і знаходяться у фазі зі струмами, які їх викликають (рис. 44.3).

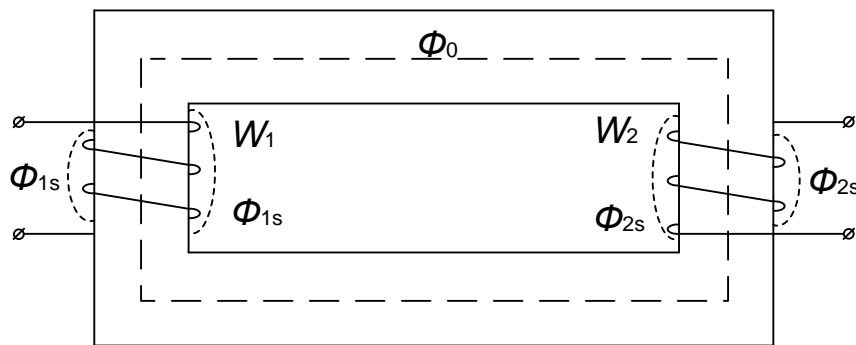


Рис.44.3

Потоки розсіювання можуть бути враховані через власні індуктивності первинної і вторинної обмоток L_1 і L_2 трансформатора.

Розрахунок процесів у трансформаторі заснований на його рівняннях, складених для первинного і вторинного кіл. Рівняння електричної рівноваги первинного кола трансформатора виглядає так:

$$U_1 = i_1 R_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + w_1 \frac{d\Phi_0}{dt},$$

а вторинного

$$-w_2 \frac{d\Phi_0}{dt} = i_2 R_2 + L_2 \frac{di_2}{dt}$$

Відношення $\frac{w_1}{w_2} = \frac{E_1}{E_2} = c$ називають коефіцієнтом трансформації.

Для зручності порівняння величин напруг і струмів у обмотках трансформатора їх значення зводять до однакового числа витків.

Розглянемо зведення числа витків вторинної обмотки до числа витків первинної. При цьому всі параметри зведеної обмотки будемо відмічати знаком

(') і називати зведеними величинами. Згідно викладеного $w_2' = w_1$. При цьому коефіцієнт трансформації зведеного трансформатора $c' = 1$.

Операція зведення повинна бути виконана так, щоб МРС вторинної обмотки після зведення не змінилася, тобто повинна бути дотримана умова $i_2' w_1 = i_2 w_2$, звідки $i_2' = \frac{1}{c} i_2$.

Таким самим чином знаходимо інші зведені величини для вторинної обмотки:

$$e_2' = c e_2; \quad R_2' = c^2 R_2; \quad L_2' = c^2 L_2; \quad u_2' = c u_2.$$

Магніторушійну силу, що визначає основний магнітний потік Φ_0 , після зведення можна представити у вигляді:

$$i_1 w_1 + i_2' w_1 = i_1 w_1 + i_2' w_1 = (i_1 + i_2') w_1 = i_0 w_1,$$

де i_0 - намагнічуючий струм трансформатора.

При незмінній напрузі U_1 намагнічуючий струм i_0 можна вважати також незмінним при всіх режимах роботи трансформатора від неробочого ходу до нормального навантаження, якщо магнітні потоки розсіювання малі порівняно з основним магнітним потоком, що зазвичай має місце.

Дослідження роботи трансформатора спрощується при переході до його еквівалентної схеми заміщення (рис.44.4). Параметри еквівалентної схеми заміщення визначаються з дослідів неробочого ходу і короткого замикання трансформатора.

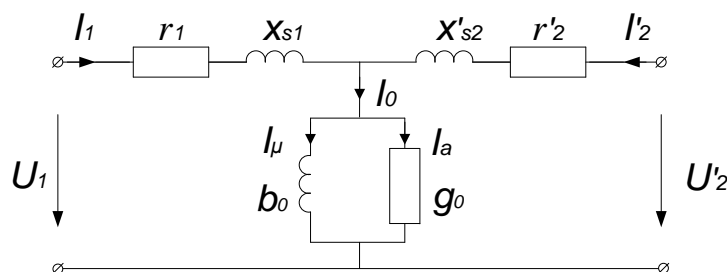


Рис.44.4

Дослід неробочого ходу трансформатора. У цьому режимі вимірюються: потужність P_{10} , струм I_{10} та напруги U_{10} і U_{20} .

Нехтуючи падінням напруги в первинній обмотці, оскільки струм неробочого ходу I_{10} малий, можна вважати що $U_{10} = -E_1$; $U_{20} = E_2$.

При цьому коефіцієнт трансформації $c = \frac{E_1}{E_2} = \frac{U_{10}}{U_{20}}$. Потужність кола P_{10} при неробочому ході дорівнює потужності втрат у сталі (нехтуючи втратами у міді). У цих умовах значеннями еквівалентних параметрів будуть:

$$Y_0 = \frac{I_{10}}{U_{10}}; \quad g_0 = \frac{P_{10}}{U_{10}^2}; \quad b_0 = \sqrt{Y_0^2 - g_0^2}; \quad \cos \varphi_{10} = \frac{P_{10}}{U_{10} I_{10}};$$

$$I_\mu = b_0 E_1 = b_0 U_{10},$$

де I_0 - намагнічуючий струм; I_μ - реактивна складова намагнічуючого струму.

Дослід короткого замикання трансформатора. У цьому режимі вимірюються: потужність P_{1K} , напруга U_{1K} , струми I_{1K} та I_{2K} . Мала напруга і великий струм на вході дозволяють знехтувати втратами у сталі і вважати, що потужність P_{1K} визначає величину втрат у міді. Параметри схеми заміщення трансформатора, що визначаються з режиму короткого замикання, розраховуються наступним чином:

$$Z_k = \frac{U_{1k}}{I_{1k}}; \quad R_k = \frac{P_{1k}}{I_{1k}^2}; \quad X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}; \quad \cos \varphi_{1k} = \frac{P_{1k}}{U_{1k} I_{1k}}.$$

Зазвичай приймають:

$$R_{1k} = R'_{2k}; \quad X_{1s} = X'_{2s}; \quad R_k = R_{1k} + R'_{2k}; \quad X_k = X_{1s} + X'_{2s}$$

Коефіцієнт корисної дії трансформатора:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_m + P_{cm}} = \frac{P_2}{P_2 + P_{1k} + P_{10}}.$$

Мінливість магнітної проникності феромагнітного осердя викликає викривлення форми кривих струмів і ЕРС, тобто створює деяку несинусоїдність цих кривих, через що можливість застосування до аналізу символічного методу стає проблематичним. Цю проблему вирішують шляхом заміни несинусоїдних кривих еквівалентними синусоїдами, створюючи цим штучний умовно-лінійний режим, дуже близький до дійсного. Багато трансформаторів при невеликих навантаженнях працюють практично у лінійному режимі.

Рівняння зведеного трансформатора у комплексній формі:

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 R_1 + \dot{I}_1 j\omega L_1 + \dot{U}_0; \quad \dot{E}_2 = \dot{I}_2' R_2' + \dot{I}_2' j\omega L_2' + \dot{U}_2'; \quad \dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2'; \quad \dot{U}_0 = -\dot{E}_1 = -\dot{E}_2'.$$

Векторна діаграма зведеного трансформатора з феромагнітним осердям при індуктивному характері навантаження, зображена на рис. 44.5. Її побудову рекомендується виконувати у наступній послідовності.

Розташувавши довільно вектор \dot{I}_2' , під кутом $\varphi_n = \arctg \frac{X_n'}{R_n'}$ до нього відкладаємо вектор \dot{E}_2' (ЕРС, наведену потоком Φ_0 у вторинній обмотці трансформатора), що відстає від вектора Φ_0 на кут, що дорівнює $\pi/2$. Враховуючи, що $\dot{U}_{10} = -\dot{E}_1$, а $\dot{E}_1 = \dot{E}_2'$, будуємо вектор $-\dot{E}_1$, а потім під кутом φ_{10} до цього вектора - вектор *намагнічуючого* струму \dot{I}_0 , модуль якого дорівнює величині струму неробочого ходу трансформатора. Віднімаючи від вектора \dot{I}_0 вектор зведеного струму вторинної обмотки \dot{I}_2' , отримуємо вектор струму первинної обмотки \dot{I}_1 . Додаючи до вектора $-\dot{E}_1$ вектор спаду напруги на активному опорі первинної обмотки $\dot{I}_1 R_1$ та вектор напруги, обумовленої наявністю індуктивності розсіяння первинної обмотки $\dot{I}_1 j\omega L_{s1}$, одержимо вектор вхідної напруги \dot{U}_1 .

Тепер є можливість побудувати зведений вектор напруги \dot{U}_2' , віднявши від зведеного вектора \dot{E}_2' вектори $\dot{I}_2' R_2'$ і $\dot{I}_2' jX_{s2}'$.

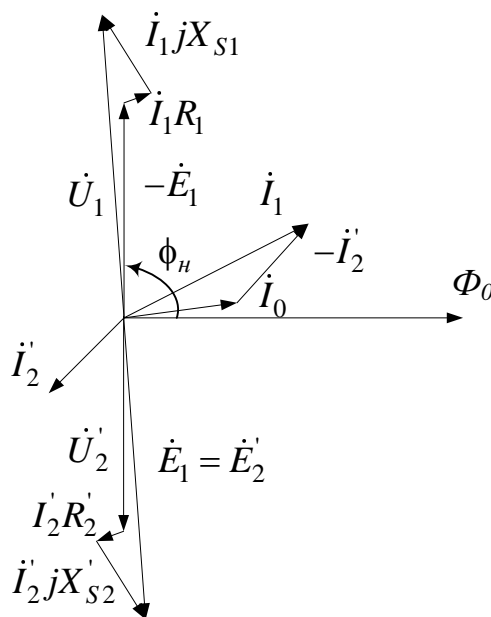


Рис.44.5

Порядок побудови векторних діаграм при активному і ємнісному навантаженнях аналогічний викладеному.

Питання для самостійної роботи

1. Проаналізувати залежність основного магнітного потоку трансформатора від величини і характеру навантаження.
2. Дослідити, які фактори впливають на форму кривої намагнічуючого струму.
3. З'ясувати, яким вимогам повинен задовольняти трансформатор, щоб можна було вважати його ідеалізованим.

Література

1. Нейман Л. Р., Демирчян К. С. Теоретические основы электротехники. - Л.: Энергоиздат, 1981, т. 2. - 415 с.
2. Зевеке Г. В., Ионкин П. А., Нетушил А. В., Страхов С. В. Основы теории цепей. - М.: Энергия, 1975. - 752 с.
3. Нейман Л. Р., Калантаров П. Л. Теоретические основы электротехники. - М.: - Л.: Госэнергоиздат, 1959, т. 2. - 444 с.
4. Зевеке Г. В., Ионкин П. А. Основы электротехники. - М. - Л.: Госэнергоиздат, 1955, т. I. - 216 с.

Лабораторна робота № 45

ДОСЛІДЖЕННЯ ОДНОФАЗНОГО ФЕРОМАГНІТНОГО ПІДСИЛЮВАЧА ПОТУЖНОСТІ

Мета роботи

Ознайомлення з конструкцією та принципом дії однофазного феромагнітного підсилювача потужності.

Дослідження робочих характеристик підсилювача, експериментальне визначення оптимальних умов його роботи на навантаження із заданими параметрами.

Підготовка до роботи

Вивчити рекомендовану літературу, ознайомитися з методичними вказівками до роботи, описом лабораторної установки, робочим завданням, підготувати протокол звіту і відповіді на наступні питання:

1. Як улаштований однофазний феромагнітний підсилювач потужності? .

2. Чому котушки робочого кола підсилювача вмикають не узгоджено, а кола керування - узгоджено ?

3. Який принцип роботи феромагнітного підсилювача потужності?

4. Чому система котушок - робочої і керуючої, розташованих на загальному феромагнітному магнітопроводі, віднесена до підсилювачів потужності?

Опис лабораторної установки

Живлення робочого кола (рис. 45.1) здійснюється від лабораторного трансформатора (ЛАТР). Струм робочого кола підсилювача проходить через опір навантаження R_L та дві обмотки w_1 (регульований індуктивний опір) і вимірюється амперметром A . Напруги на вході робочого кола, на навантаженні

та на обмотках w_1 підсилювача вимірюються вольтметрами V, V_H, V_1 . Усі зазначені вимірювальні прилади електромагнітної системи.

Живлення кола керування здійснюється від регульованого за допомогою потенціометра R_0 джерела постійної напруги, струм якого, проходячи по обмоткам w_0 , магнітно зв'язаними з обмотками w_1 , викликає зміну опору цих обмоток, і відповідно, зміну струму в робочому колі.

Напруга та струм кола керування вимірюються приладами магнітоелектричної системи: вольтметром V_0 та амперметром A_0 .

Порядок виконання роботи

I. Скласти коло за схемою на рис. 45.1.

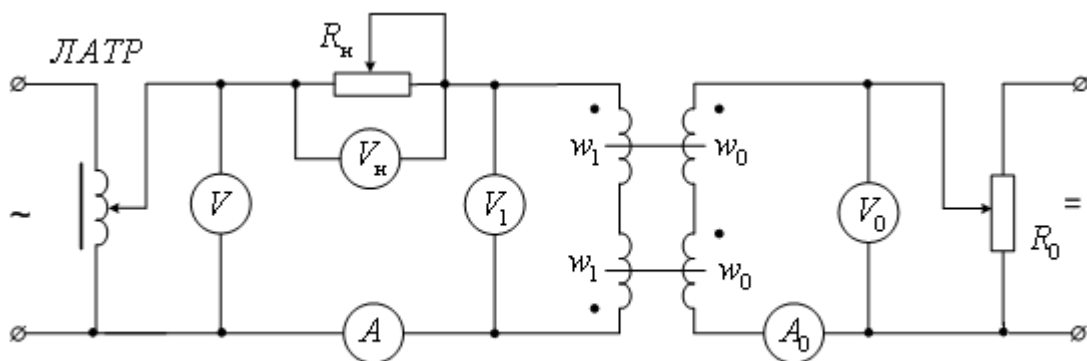


Рис. 45.1

2. При незмінному навантаженні $R_H = (0.1 - 0.3)R_{H \max}$ зняти залежності $U_1 = f(I)$, змінюючи підведену напругу, для трьох-чотирьох значень струму підмагнічування, включаючи $I_0 = 0$. При виконанні дослідів U_1 і I_0 не повинні перевищувати номінальних значень, зазначених у паспорті магнітного підсилювача. Результати вимірів занести до табл. 45.1.

Таблиця 45.1

№ п/п	$I_0 = 0$		$I_0 = 0.1$		$I_0 = 0.2$		$I_0 = 0.3$	
	U_1	I	U_1	I	U_1	I	U_1	I
1								
2								

3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								

3. При незмінному опорі навантаження $R_n = (0.1 - 0.3)R_{n \max}$ і постійній величині вхідної синусоїдної напруги зняти залежність струму у навантаженні, напруги на навантаженні, напруги на затискачах робочого кола феромагнітного підсилювача від значення струму підмагнічування I_0 . Результати вимірів занести до табл. 45.2.

Таблиця 45.2

№ п/п	I_0	U_0	U_1	U_i	I	P_n	P_0
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							

4. При номінальній величині вхідної синусоїдної напруги і постійному струмі підмагнічування, який дорівнює $I_0 = (0.1 - 0.6)I_{0 \text{ ном}}$, зняти залежності

струму у робочому колі і напруги на навантаженні від значення її опору. Результати вимірів занести до табл. 45.3.

Таблиця 45.3

	$I_0 = 0$			
№ п/п	R_n	I	U_n	P_n
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				

Обробка результатів експерименту

1. За даними табл. 45.1 побудувати в одній координатній системі сімейство графіків $U_1 = f_1(I)$ і сім'ю графіків $Z_{роб} = f_2(I)$. Проаналізувати характер зміни побудованих залежностей і усвідомити вплив на них струму підмагнічування.

2. За результатами досліду п.3 для кожного значення I_0 обчислити потужність, споживану навантаженням P_n і колом керування феромагнітного підсилювача P_0 . Обчислені величини занести до табл. 45.2.

3. За даними табл. 45.2 в одній системі координат побудувати графіки залежностей $I = f_1(I_0)$; $U_1 = f_2(I_0)$; $U_n = f_3(I_0)$, зазначивши по осі ординат масштаби струму навантаження і напруг U_1 , U_n .

4. За даними табл. 45.2. розрахувати залежності $\alpha_z = f_6(I_0)$ і $\alpha_p = f_7(I_0)$, де α_i - коефіцієнт підсилення по струму; α_p - коефіцієнт підсилення по потужності.

5. За даними п. 3 і п. 4 побудувати графіки залежностей:

$$P_i = f_4(I_0); P_0 = f_5(I_0); \alpha_i = f_6(I_0); \alpha_p = f_7(I_0)$$

і проаналізувати вплив струму підмагнічування на робочі характеристики феромагнітного підсилювача.

6. За даними досліду п. 4 для кожного значення опору навантаження R_i обчислити потужність навантаження P_i , розраховані дані занести до табл. 45.3.

7. За даними табл. 45.3 побудувати графіки залежностей $I = \varphi_1(R_i)$ і $P_i = \varphi_2(R_i)$. Визначити опір, при якому потужність навантаження буде максимальною.

8. Зробити висновки по роботі.

Методичні вказівки

Феромагнітний підсилювач потужності складається з двох однакових феромагнітних магнітопроводів, на кожному з яких міститься по дві обмотки з числом витків w_1 і w_0 . Обмотки з числом витків w_1 вмикають послідовно і не узгоджено, з'єднуючи послідовно з приймачем, що має опір R_n . Це коло живиться від джерела змінної синусоїдної напруги і є робочим колом феромагнітного підсилювача потужності. Обмотки з числом витків w_0 вмикають послідовно і узгоджено. Ці обмотки утворюють коло керування, що живиться від джерела постійної напруги.

Принципова схема найпростішого феромагнітного підсилювача потужності зображена на рис. 45.2.

Різниця у способах ввімкнення обмоток робочого кола і кола керування застосована для виключення впливу джерела змінної напруги на джерело

живлення постійної напруги, а також компенсації парних гармонік струму в навантаженні, що з'являються в результаті підмагнічування магнітопроводів струмом I_0 .

При проходженні струму в обмотці керування змінюється ступінь насичення магнітопроводу і, отже, змінюється індуктивність котушки робочого кола, що при незмінній величині напруги мережі живлення призводить до зміни струму і потужності в опорі навантаження.

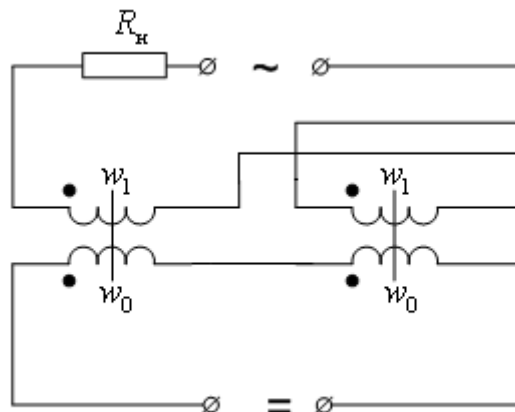


Рис. 45.2

Чим більший струм підмагнічування I_0 , тим менша індуктивність котушки і тим більша потужність, що віддається приймачу. Якщо виконується умова $I_0^2 R_0 \ll I^2 R_1$, то виникає можливість керування значною потужністю у приймачі при незначній потужності в керуючому колі.

Характеризують роботу підсилювача такими величинами:

$$\text{коефіцієнтом підсилення за струмом } \alpha_i = \frac{\Delta I}{\Delta I_0};$$

$$\text{коефіцієнтом підсилення за потужністю } \alpha_p = \frac{\Delta P}{\Delta P_0},$$

$$\text{де } P = U_n I; P_0 = U_0 I_0.$$

Коефіцієнт підсилення за потужністю може бути обчислений також за формулою:

$$\alpha_p = \frac{(I^2 - I_{(0)}^2)R_n}{I_0^2 R_0},$$

тут I – діюче значення змінного струму при струмі підмагнічування I_0 ; $I_{(0)}$ – діюче значення змінного струму при відсутності струму підмагнічування; R_n – опір навантаження; R_0 - опір кола керування.

Важливою характеристикою феромагнітного підсилювача потужності є характеристика підмагнічування – сімейство вольт-амперних характеристик робочого кола при різних значеннях струму підмагнічування. За характеристиками підмагнічування виконується розрахунок струму підмагнічування, що забезпечує необхідне значення робочого струму в навантаженні із заданим опором.

Питання для самостійної роботи

1. Яка характерна особливість вольт-амперної характеристики робочого кола магнітного підсилювача?
2. Як впливає величина струму підмагнічування на вид вольт-амперної характеристики магнітного підсилювача?
3. Як впливає значення струму підмагнічування на величину струму в робочому колі, потужність у навантаженні при незмінній величині діючого значення напруги джерела живлення?
4. Якими коефіцієнтами характеризується ефект посилення підсилювача потужності? Як впливає на ці коефіцієнти струм підмагнічування при незмінному опорі навантаження?
5. При якій умові потужність, яка споживається навантаженням феромагнітного підсилювача потужності є максимальна?
6. Як впливає величина струму підмагнічування на положення точки максимуму потужності у навантаженні?

7. Чи можна коло керування підсилювача потужності живити від джерела змінної напруги?

Література

1. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. Основы теории цепей. – М. Энергоатомиздат, 1989. – с. 477 – 479.
2. Б.Я. Жуховицкий, И.Б. Негневицкий. Теоретические основы электротехники. Т. 2 – М. «Энергия». 1972. – с. 175 – 177.

Лабораторна робота № 34

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ З ПОСЛІДОВНИМ З'ЄДНАННЯМ ЕЛЕМЕНТІВ

Мета роботи

Дослідження перехідних процесів в електричних колах постійного струму при послідовному з'єднанні: резистивно-індуктивних (RL) елементів; резистивно-ємнісних (RC) елементів; резистивно-індуктивно-ємнісних (RLC) елементів.

Підготовка до роботи

Вивчити рекомендовану літературу, ознайомитися з методичними вказівками до роботи, описом лабораторної установки, робочим завданням, підготувати протокол звіту і відповісти на наступні питання:

1. Які закони комутації ви знаєте та на якому базовому фізичному законі вони ґрунтуються ?
2. Яка фізична та математична сутність вимушеної і вільної складових перехідного процесу ?
3. Якою енергією забезпечується вільна складова перехідного процесу ?
4. Що таке стала часу електричного кола та як її можна визначити ?
5. За яких умов виникає коливальний або аперіодичний перехідний процес?
6. Що таке початкові умови, якими вони бувають і як визначаються ?
7. Як визначити сталі інтегрування загального рішення перехідного струму (напруги) ?

Опис лабораторної установки

Для електропостачання використовується джерело регульованої постійної напруги стенду НДЛС, на яке вмикається досліджуване електричне коло через транзисторний комутатор (далі ключ). Схема пристрою наведена на рис. 34.1 а.

Період перемикань ключа K при застосуванні внутрішньої синхронізації, дорівнює періоду промислової частоти ($T = 0.02$ с). Таким чином ключ

половину періода ($0,01c$) замкнений і половину періода (теж $0,01c$) розімкнений.

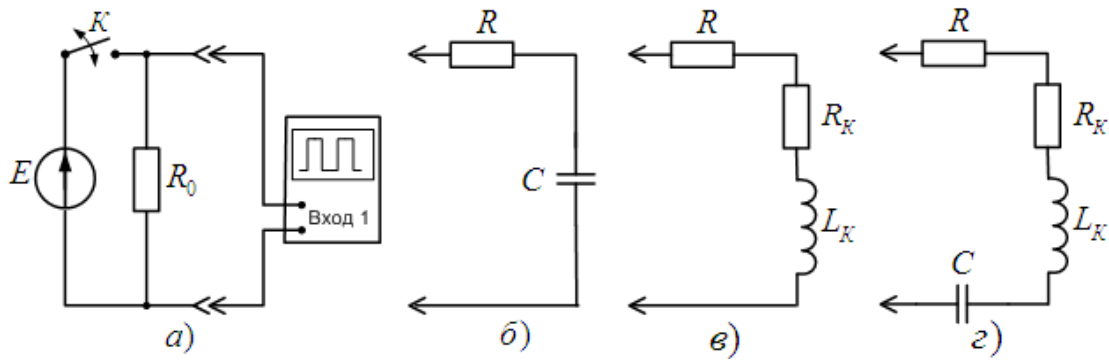


Рис. 34.1

Досліджувані кола (RC , RL , або RLC) складають на набірному полі стенду з елементів, розміщених у блоках опорів, ємностей та індуктивностей стенду. Через опір $R_0 \approx 50$ Ом відбувається розряд ємності чи індуктивності при розмиканні комутатора K . Для спостереження кривих струму і напруги на окремих ділянках досліджуваного електричного кола під час перехідного процесу використовується осцилограф.

Порядок виконання роботи

Калібровка осцилографа.

Скласти електричне коло, зображене на рис.34.1а. Встановити напругу регульованого джерела постійної напруги $U = 12$ В. Підключити гніздо "Вход 1" осцилографа до резистора R_0 . Увімкнути транзисторний комутатор в режимі внутрішньої синхронізації, а осцилограф - в режимі зовнішньої синхронізації від однієї з фаз блоку трифазної напруги 5 В, після чого спостерігати на екрані осцилографа прямокутні імпульси напруги. Обертанням ручок "Длительность развертки" (2 мс) та "Стабильность" домогтися того, щоб на екрані спостерігався один період прямокутної імпульсної напруги (як показано на рис.34.2). Виміряти в міліметрах розмір одного періоду ℓ_T та визначити масштаб часу за формулою: $m_t = 0.02 / \ell_T$. Якщо зробити $\ell_T = 100$ мм, тоді $m_t = T / \ell_T = 0,02 / 100 = 0.2$ мс/мм. Поворотом ручки "Чувствительность" встановити розмір амплітудного значення імпульсної напруги на екрані осцилографа 30 мм та обчислити масштаб напруги за формулою:

$$m_U = E / \ell_U = 12 / 30 = 0,4 \text{ В/мм.}$$

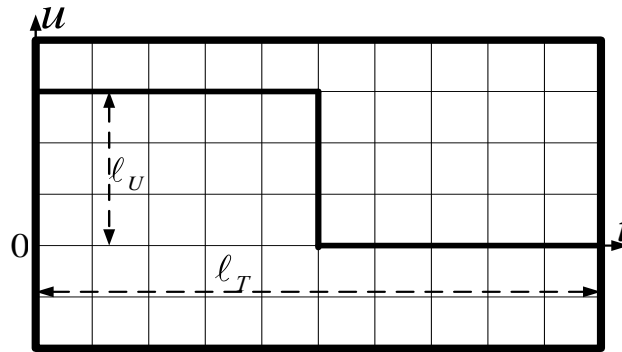


Рис. 34.2

Дослідження перехідного процесу у колі RC

1. Підключити до джерела імпульсної напруги послідовно з'єднані резистор $R_4 = 200 \text{ Ом}$ та конденсатор C_2 (рис. 34.1б). Подати на вхід осцилографа сигнал напруги з конденсатора. Спостерігати на екрані криві зміни напруги конденсатора під час двох перехідних процесів: при підключенні джерела енергії (ліва половина екрану) - заряд конденсатора; при відімкненні джерела енергії (права половина екрану) - розряд конденсатора.

2. Ручками " \leftrightarrow " та "Синхронизация" сумістити початок перехідного процесу при заряді конденсатора з початком розгортки осцилографа, слідкуючи за тим, щоб розмір періоду сигналу дорівнював розміру l_T , який використовувався при визначенні масштабу m_t . За наявності стійкої зовнішньої синхронізації ці умови виконуються автоматично.

3. Сфотографувати або замалювати у масштабі з екрану осцилографа криві зміни напруг $u_R(t)$ та $u_C(t)$ під час заряду та розряду конденсатора. Користуючись кривою $u_R(t)$, побудувати у масштабі m_i графік $i(t)$.

4. Повторити дослід при $R_4 = 100 \text{ Ом}$.

Дослідження перехідного процесу у колі RL

Під'єднати до джерела імпульсної напруги послідовно з'єднані резистор $R_4 = 500$ Ом та котушку індуктивності L_2 , яка має невідомі параметри R_K та L_K (рис.34.1в).

Сфотографувати або змалювати у масштабі з екрану осцилографа криві зміни $u_K(t)$ та $u_R(t)$. Користуючись осцилограмою $u_R(t)$ побудувати у масштабі графік струму $i(t)$.

Повторити дослід при $R_4 = 300$ Ом.

Дослідження перехідного процесу у колі RLC

Виміряти опір котушки R_K омметром. Підключити послідовно з'єднані резистор $R_4 = 50$ Ом, конденсатор $C_4 = 3$ мкФ, та котушку індуктивності $L_4 = 60$ мГн (з параметрами R_K, L_K) до джерела імпульсної напруги (рис. 34.1г).

Сфотографувати або змалювати у масштабі з екрану осцилографа криві зміни $u_R(t)$, $u_K(t)$ та $u_C(t)$ при коливальному заряді та розряді конденсатора (звертаємо увагу на те, що активний опір кола при розряді конденсатора збільшується на величину R_0).

Підібрати ємність C контуру, при якій частота коливань ω' зарядного струму подвоїться (при цьому період коливань зменшиться вдвічі).

Сфотографувати або змалювати графіки $u_R(t)$, $u_L(t)$ та $u_C(t)$.

Встановити $R_4 = 250$ Ом, $C_4 = 3$ мкФ, $L_4 = 60$ мГн. Сфотографувати або змалювати у масштабі з екрану осцилографа криві зміни $u_R(t)$, $u_K(t)$ та $u_C(t)$ при аперіодичному заряді та розряді конденсатора

Розрахувати значення опору критичного режиму за формулою

$$R_{KP} = 2\sqrt{\frac{L}{C}} \text{ . при параметрах: } L = 60 \text{ мГн та } C = 3 \text{ мкФ.}$$

Підібрати експериментально, користуючись зображенням кривої $u_R(t)$ при заряді конденсатора, величину опору R_4 , яка відповідає критичному режиму при вказаних параметрах L та C , враховуючи, що загальний опір кола при заряді дорівнює: $(R_4 + R_K)$. Упевнитись, що цей опір відповідає розрахованому значенню R_{KP} .

Сфотографувати або змалювати графіки $u_R(t)$, $u_L(t)$ та $u_C(t)$ критичного режиму.

Обробка результатів експериментів:

1. Перехідний процес у колі RC

1.1. Користуючись даними дослідів, для кожного з режимів визначити сталу часу τ кола та ємність конденсатора C_2 , окремо при заряді конденсатора та при його розряді.

1.2. За осцилограмою $u_C(t)$ для різних режимів, упевнитись у виконанні другого закону комутації, (пояснити як).

1.3. Зробити письмовий висновок про вплив величини опору резистора R_4 на швидкість перехідного процесу.

1.4. Користуючись осцилограмою одного з режимів, розрахувати числові значення складових аналітичних виразів для $u_C(t)$, $u_R(t)$ та $i_C(t)$ при заряді та розряді конденсатора. Для кожного члена бригади обрані осцилограми напруг повинні бути різними.

2. Перехідний процес у колі RL

2.1. За даними дослідів розрахувати активний опір котушки R_K , сталу часу τ , а через неї - індуктивність котушки L_K , окремо при заряді індуктивності та при її розряді.

2.2. Користуючись осцилограмами $u_R(t) = R_4 \cdot i(t)$ для різних режимів, упевнитись у виконанні першого закону комутації.

2.3. Зробити висновок щодо впливу величини активного опору в колі RL на швидкість перехідного процесу.

2.4. Користуючись осцилограмою одного з режимів, записати аналітичні вирази для $u_K(t)$, $u_R(t)$ та $i(t)$ при заряді та розряді котушки індуктивності. Для кожного члена бригади обрані осцилограми напруг повинні бути різними.

3. Перехідний процес у колі RLC

3.1. Користуючись осцилограмою $u_R(t)$ при коливальному перехідному процесі визначити період T' коливань та їх кутову частоту ω' . Розрахувати декремент коливань $\Delta = \frac{u_C(t)}{u_C(t+T')} = e^{\delta T'}$, логарифмічний декремент коливань $\ln \Delta = \delta T'$ та згасання $\delta = \frac{\ln \Delta}{T'}$ контуру для обох режимів (заряду і розряду конденсатора).

3.2. Розрахувати ємність конденсатора аналітично (див. формулу (34.8) методичних вказівок) для режиму подвоєної частоти, враховуючи, що індуктивність контуру залишилась незмінною, а загальний активний опір кола при заряді конденсатора дорівнює $(R_4 + R_K)$. Порівняти розраховане та підібране експериментально значення ємностей конденсатора.

3.3. Зробити в протоколі письмовий висновок щодо впливу величини опору резистора R_4 на характер перехідного процесу у колі RLC .

3.4. Записати аналітичні вирази для $u_C(t)$, $u_K(t)$, $u_R(t)$ та $i(t)$ при заряді та розряді конденсатора на коло RL . Для кожного члена бригади досліджувані режими повинні бути різними.

Методичні вказівки.

Перехідним називається електромагнітний процес, що відбувається в електричному колі під час переходу його від одного усталеного стану (режиму) до іншого. Зміну стану кола може викликати зміна його структури (вмикання, вимикання, коротке замикання гілок чи окремих ділянок, тощо), або зміна фізичних величин (значень ЕРС, параметрів елементів). Такі зміни звичайно називають комутаціями.

Електромагнітні процеси в лінійних електричних колах зі сталими параметрами у загальному випадку описуються системами лінійних інтегро-диференціальних рівнянь, оскільки напруги на резистивних, індуктивних і ємнісних елементах відповідно записуються такими виразами:

$$u_R(t) = Ri(t); \quad u_L(t) = L \frac{di}{dt}; \quad u_C(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt + u_C(0). \quad (34.1)$$

Відповідно, перехідний електромагнітний процес у колі рис. 34.3 при підключенні послідовно з'єднаних резистивно-індуктивних елементів до джерела постійної напруги описується рівнянням:

$$E = u_R(t) + u_L(t), \quad \text{або} \quad E = Ri(t) + L \frac{di}{dt}. \quad (34.2)$$

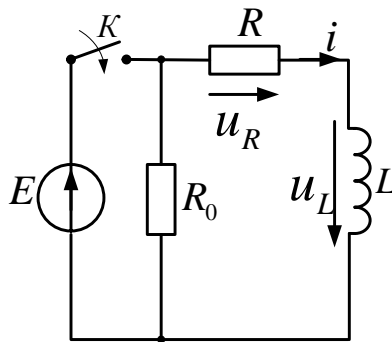


Рис. 34.3

Розв'язавши рівняння (34.2) відносно струму, отримаємо:

$$i(t) = \frac{E}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L}t}) = i_{ycm} (1 - e^{-\frac{R}{L}t}),$$

тут i_{ycm} - усталений струм кола рис. 34.1 після закінчення перехідного процесу.

$$\text{Напруга на індуктивності } u_L(t) = E e^{-\frac{R}{L}t}.$$

Графіки залежностей $i(t)$ та $u_L(t)$ при підключенні послідовно з'єднаних резистора та індуктивності до джерела постійної напруги наведені на рис. 34.4.

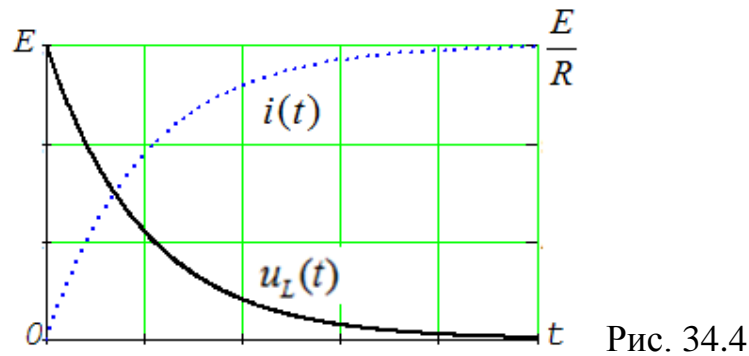


Рис. 34.4

Після відключення електричного кола RL від джерела ЕРС і одночасним його вмиканням на опір R_0 (рис.34.5), перехідний процес буде описуватись рівнянням:

$$0 = u_R(t) + u_{R_0}(t) + u_L(t), \text{ або } 0 = i(t)(R + R_0) + L \frac{di(t)}{dt}. \quad (34.3)$$

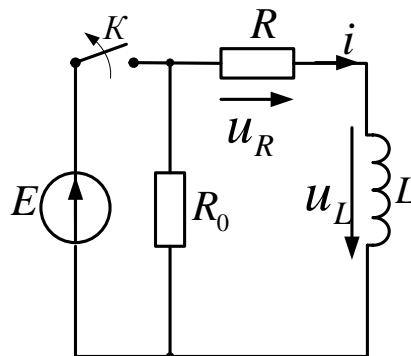


Рис. 34.5

Розв'язавши рівняння (34.3) відносно струму, отримаємо вираз:

$$i(t) = \frac{E}{R} e^{-\frac{R+R_0}{L}t} = i(0) e^{-\frac{R+R_0}{L}t}.$$

$$\text{Напруга на індуктивності } u_L(t) = L \frac{di(t)}{dt} = -\frac{R+R_0}{R} E e^{-\frac{R+R_0}{L}t}.$$

Графіки залежностей $i(t)$ та $u_L(t)$ при розряді індуктивності в схемі рис. 34.5 наведені на рис. 34.6.

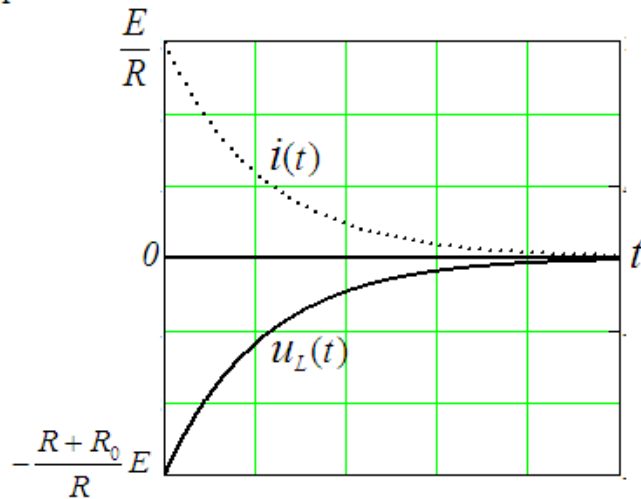


Рис. 34.6

Зауваження: В реальних умовах котушка індуктивності не є ідеальною: вона крім індуктивності має ще й активний опір R_K провідника обмотки. Схема з реальною котушкою представлена рис. 34.7. Тут також враховано, що при розряді котушки слід враховувати додатковий опір R_0 .

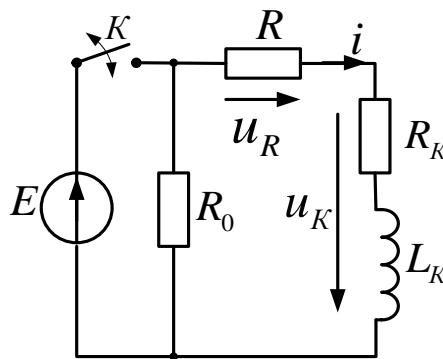


Рис. 34.7

В результаті рівняння для струму та напруг цього кола зміняться. Струм перехідного процесу при підключенні до джерела буде змінюватись за співвідношенням:

$$i(t) = \frac{E}{R+R_K} (1 - e^{-\frac{R+R_K}{L}t}),$$

а закономірність зміни напруги на котушці в цьому режимі буде такою:

$$u_k(t) = R_K i(t) + L_K \frac{di}{dt} \quad \text{або} \quad u_k(t) = \frac{ER_K}{R+R_K} + \frac{ER}{R+R_K} e^{-\frac{R+R_K}{L}t}.$$

Відповідні графіки $i(t)$ та $u_k(t)$ представлені на рис. 34.8

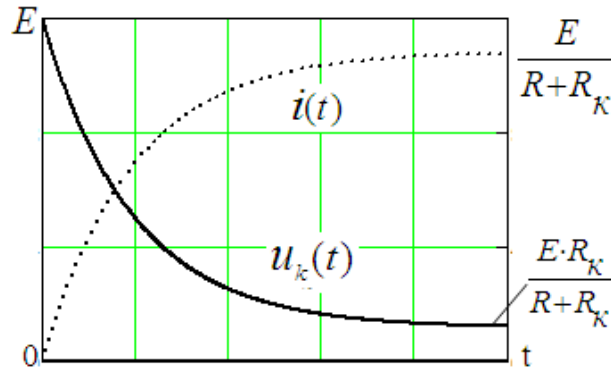


Рис. 34.8

Після відключення джерела ЕРС від досліджуваного кола (рис. 34.7) рівняння (34.3) зміниться на (34.3*) $0 = i(t)(R + R_k + R_0) + L \frac{di(t)}{dt}$.

(34.3*) Матимемо також зміни у розв'язках відносно $i(t)$ та $u_k(t)$:

$$i(t) = \frac{E}{R+R_k} (1 - e^{-\frac{R+R_k+R_0}{L}t}); \quad u_k(t) = -\frac{R+R_0}{R+R_k} E e^{-\frac{R+R_0+R_k}{L}t}.$$

Перехідний процес у колі з послідовним з'єднанням резистивного і ємнісного елементів при вмиканні його на джерело постійної напруги (рис. 34.9) описується рівнянням (34.4).

$$E = u_R(t) + u_C(t) = Ri(t) + u_C(t) = RC \frac{du_C(t)}{dt} + u_C(t). \quad (34.4)$$

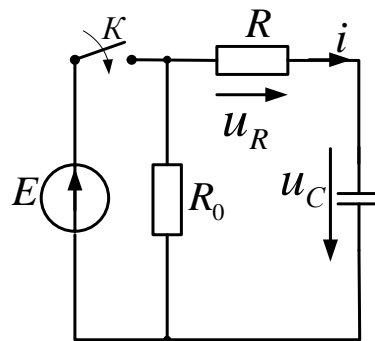
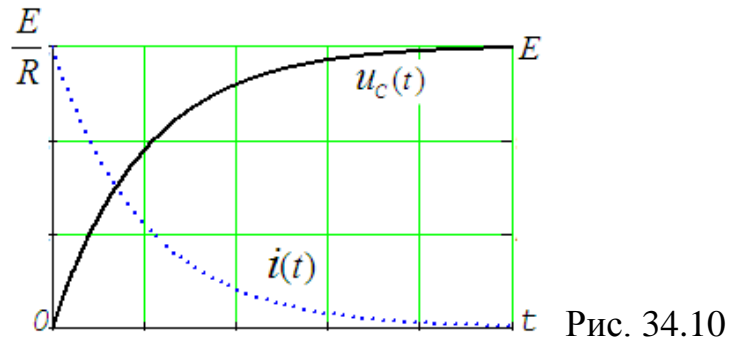


рис. 34.9

$$\text{Звідки } u_C(t) = E(1 - e^{-\frac{1}{RC}t}); \quad i(t) = C \frac{du_C(t)}{dt} = \frac{E}{R} e^{-\frac{1}{RC}t}.$$

Графіки залежностей $i(t)$ та $u_C(t)$ при заряді конденсатора наведені на рис.34.10.



Перехідний процес при розряді ємності C через опори R та R_0 (рис. 34.11) описується рівнянням (34.5).

$$0 = u_R(t) + u_{R_0}(t) + u_C(t) = (R + R_0)i(t) + u_C(t) = (R + R_0)C \frac{du_C(t)}{dt} + u_C(t) \quad (34.5)$$

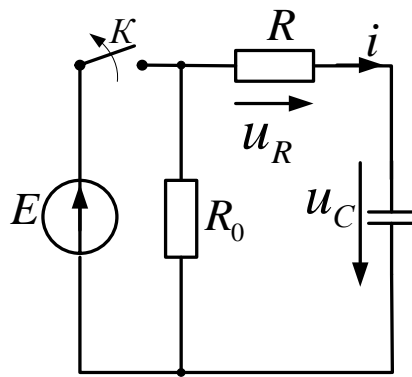


Рис. 34.11

Розв'язок рівняння (34.5) дає вирази для напруги на ємності та струму у колі відповідно:

$$u_C(t) = E e^{\frac{-1}{(R+R_0)C}t}; \quad i(t) = C \frac{du_C(t)}{dt} = -\frac{E}{R + R_0} e^{\frac{-1}{(R+R_0)C}t}.$$

Графіки залежностей $i(t)$ та $u_C(t)$ у розглянутому режимі наведені на рис.34.12.

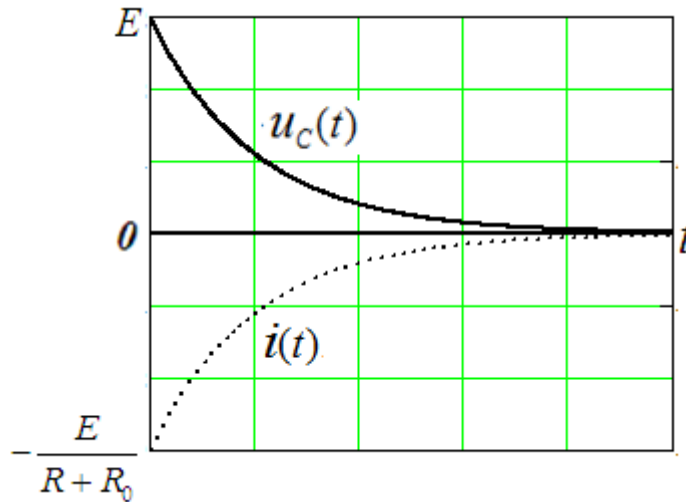


Рис. 34.12

Як бачимо, у електричних колах при послідовному з'єднанні резистивно-індуктивних елементів (RL) або резистивно-ємнісних елементів (RC) (такі кола вважаються колами першого порядку), складові струмів та напруг, які характеризують вільний режим, змінюються за законом експоненти:

$$i(t) = i_{уст} + Ae^{pt} = i_{уст} + Ae^{-\frac{t}{\tau}}. \text{ Швидкість згасання перехідного процесу}$$

визначається показником експоненти і характеризується сталою часу $\tau = \frac{1}{|p|}$.

Для кола RC : $\tau = RC$, а для кола RL : $\tau = L/R$. Стала часу τ - це проміжок часу, протягом якого вільна складова струму або напруги зменшується у e разів ($e = 2.7183$ - основа натуральних логарифмів).

$$\text{При } t = 0: \quad i(0) = i_{уст} + A, \text{ звідки } A = i(0) - i_{уст}$$

$$\text{При } t = \tau: \quad i(\tau) = i_{уст} + Ae^{-1} = i_{уст} + \frac{A}{e} = i_{уст} + \frac{A}{2.7183}$$

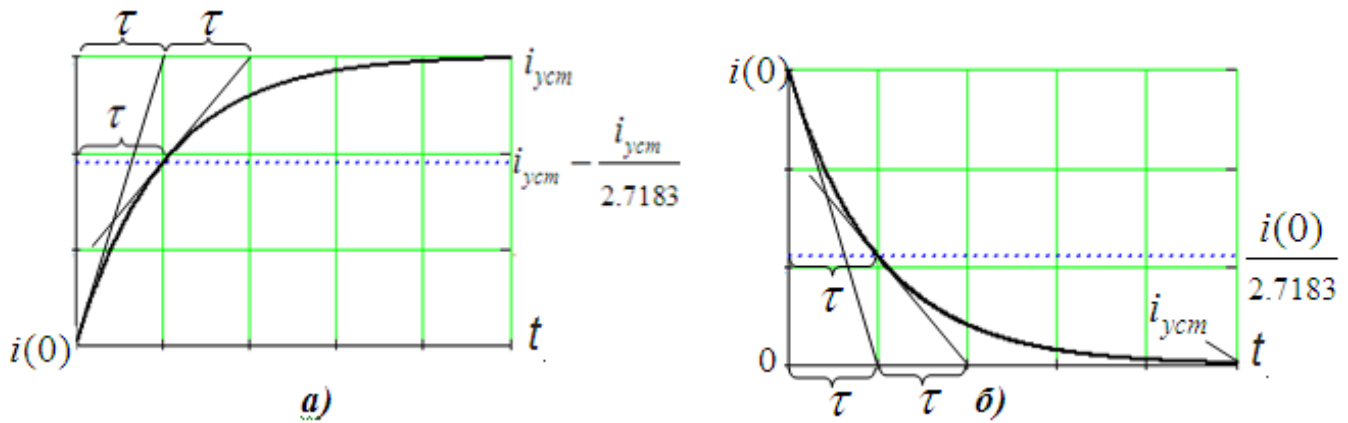


Рис. 34.13

Сталу часу в електричному колі з одним накопичувальним елементом (індуктивністю чи ємністю) можна визначити також графічним шляхом. Для цього у будь-якій точці кривої струму або напруги проводять дотичну до її перетину з усталеним (вимушеним) значенням. Відстань у часі між точкою дотику та точкою перетину з рівнем усталеного значення і буде дорівнювати сталій часу. На рис.34.13 *а* і *б* демонструються обидва способи визначення сталої часу τ .

За проміжок часу $t = 5\tau$ вільна складова зменшується від початкового значення у $e^5 = 148.4$ рази, що складає 0,674%, тому вважають, що за цей проміжок часу перехідний процес практично закінчується, хоч теоретично він продовжується нескінченно довго.

Розглянемо електромагнітний процес, який має місце при підключенні до джерела постійної напруги електричного кола з послідовно з'єднаними резистивним, індуктивним та ємнісним елементами (коло RLC , рис.34.14),

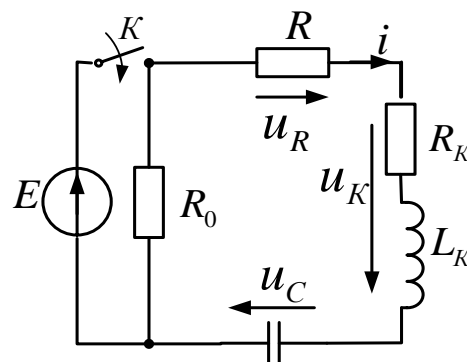


Рис. 34.14

Рівняння цього кола має такий вигляд:

$$E = u_R(t) + u_K(t) + u_C(t) = R\dot{i}(t) + R_k i(t) + L_k \frac{di}{dt} + u_C(t)$$

З урахуванням (34.1) одержимо:

$$E = LC \frac{d^2 u_C}{dt^2} + (R + R_k) \cdot C \frac{du_C}{dt} + u_C(t). \quad (34.6)$$

Для розв'язку рівняння (34.6) запишемо відповідне йому характеристичне рівняння:

$$L \cdot C \cdot p^2 + (R + R_k) \cdot C \cdot p + 1 = 0 \quad \text{або} \quad p^2 + \frac{R + R_k}{L} p + \frac{1}{LC} = 0 \quad (34.7)$$

Корені цього квадратного рівняння визначимо так

$$p_{1,2} = -\frac{(R + R_k)}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{(R + R_k)}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}}.$$

Позначимо: $\delta = \frac{(R + R_k)}{2L}$ та $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, тоді $p_{1,2} = -\delta \pm \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}$.

В залежності від співвідношення між величинами $(R + R_k)$, L та C отримаємо три варіанти коренів характеристичного рівняння:

а) при $\delta > \omega_0$ корені будуть дійсними та різними, а перехідний процес - аперіодичним;

б) при $\delta = \omega_0$ одержимо два дійсних, однакових кореня $p_1 = p_2 = -\delta$, що відповідає граничному аперіодичному режиму. Параметри кола, за яких відбувається цей режим, називаються критичними і між ними існує така

залежність: $R_{кр} = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$; (Пам'ятаємо, що у лабораторній роботі цей опір

складається з двох складових: $R_{кр} = R + R_k$);

в) при $\delta < \omega_0$ корені p вийдуть комплексно-спряженими

$$p_{1,2} = -\delta \pm j\omega', \quad \omega' = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2},$$

а перехідний процес матиме коливальний характер, в якому δ характеризує згасання амплітуди коливань, а ω' - їх частоту.

Графіки залежностей $u_C(t)$, $u_L(t)$ та $u_R(t) = Ri(t)$ під час аперіодичного а) та коливального б) перехідного процесу в колі RLC наведені на рис.34.15.

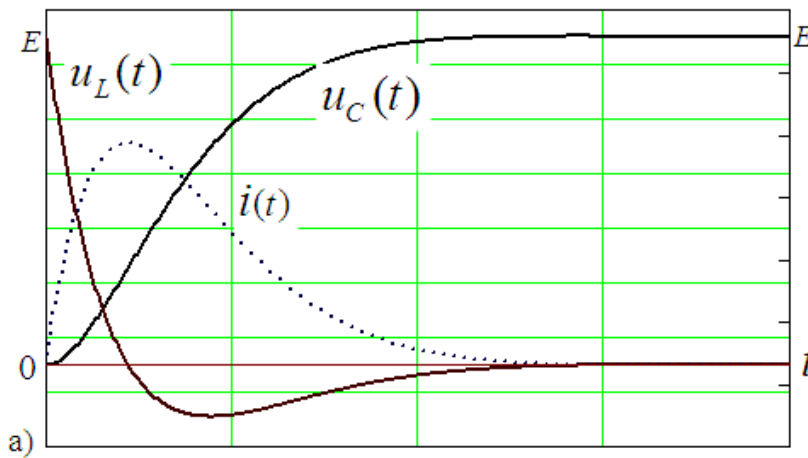


Рис. 34.15 а

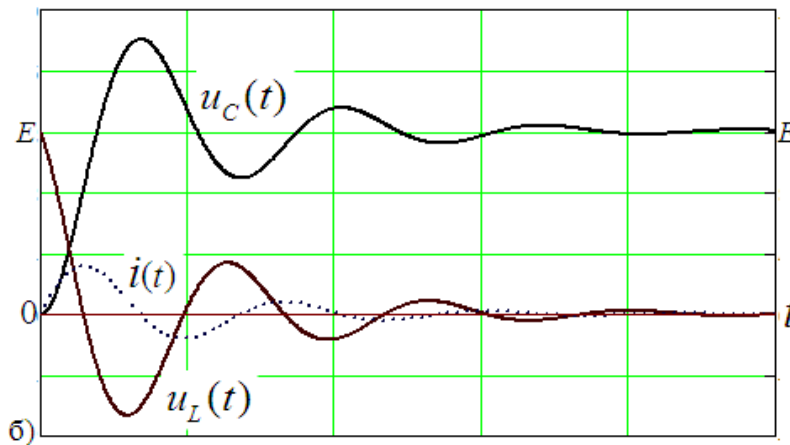


Рис. 34.15 б

При аперіодичному заряді ємності струми та напруги змінюються, як показано на рис.34.15а. При коливальному заряді ємності струми та напруги змінюються, як показано на рис.34.15б.

Для критичних параметрів елементів електричного кола, що відповідають граничному режиму, криві залежностей $u_C(t)$, $u_L(t)$ та $u_R(t)$ мало відрізняються від тих, що наведені на рис.34.15а.

При дослідженні впливу ємності кола на частоту власних коливань ω' зарядного струму, величину ємності за умови зростання власної частоти

контуру в 2 рази ($\omega'_2 = 2\omega'_1$) визначають із співвідношення
$$C_2 = \frac{C_1}{4 - \frac{3\delta^2}{\omega_{01}^2}} .$$

(34.8)

Тут: C_1 – величина ємності кола, що відповідає частоті власних коливань ω'_1 ;

$$\omega_{01}^2 = \frac{1}{LC_1}; \quad \delta = \frac{R + R_K}{2L}.$$

При відключенні джерела постійної напруги від електричного кола з послідовно з'єднаними резистивним, індуктивним та ємнісним елементами (коло RLC , рис.34.16), конденсатор, попередньо заряджений до напруги $u_C(0) = E$, буде розряджатись через L_K, R_K, R, R_0 .

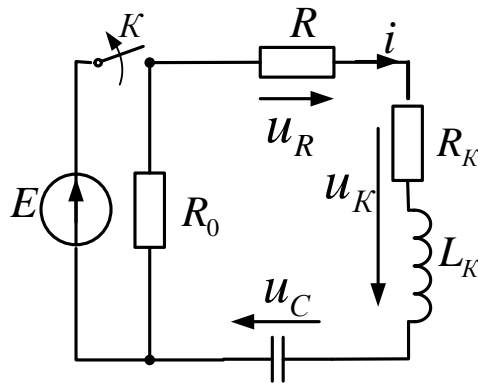


Рис. 34.16

В цьому випадку рівняння кола матиме наступний вигляд:

$$0 = u_R(t) + u_L(t) + u_C(t) = Ri(t) + R_K i(t) + R_0 i(t) + L_K \frac{di}{dt} + u_C(t).$$

З урахуванням (34.1) одержимо:

$$0 = LC \frac{d^2 u_C}{dt^2} + (R + R_K + R_0) \cdot C \frac{du_C}{dt} + u_C(t). \quad (34.9)$$

Для розв'язку рівняння (34.9) запишемо відповідне йому характеристичне рівняння (34.10):

$$L \cdot C \cdot p^2 + (R + R_K + R_0) \cdot C \cdot p + 1 = 0 \quad \text{або} \quad p^2 + \frac{R + R_K + R_0}{L} p + \frac{1}{LC} = 0 \quad (34.10)$$

Корені цього квадратного рівняння визначимо так

$$p_{1,2} = -\frac{(R + R_K + R_0)}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{(R + R_K + R_0)}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}}.$$

Позначимо: $\delta = \frac{(R + R_k + R_0)}{2L}$ та $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, тоді $p_{1,2} = -\delta \pm \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}$.

В залежності від співвідношення між величинами $R_e = R + R_k + R_0$, L та C отримаємо три варіанти коренів характеристичного рівняння, як і при підключенні кола RLC до джерела постійної ЕРС.

Графіки залежностей $u_C(t)$, $u_L(t)$ та $u_R(t) = Ri(t)$, під час аперіодичного *a* та коливального *б* розряду конденсатора в колі RLC , наведені на рис. 34.17.

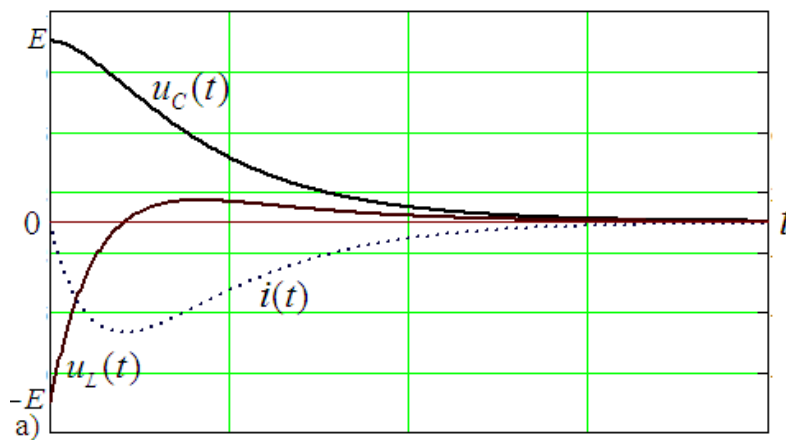


Рис. 34.17 *a*

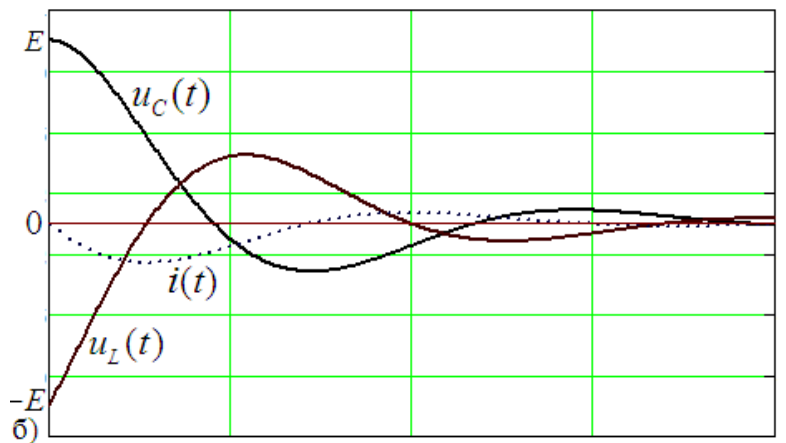


Рис. 34.17 *б*

Питання для самостійної роботи

1. Чому виникають перехідні процеси ?
2. Які складові мають струми та напруги під час перехідного процесу ?
3. Якою енергією забезпечується вільна складова перехідного процесу ?

4. Чи можуть змінюватись стрибком напруга і струм котушки індуктивності або напруга і струм конденсатора?

5. Яким чином стала часу τ характеризує перехідний процес, і як її визначити у колі при послідовному з'єднанні резистивного та індуктивного елементів (коло RL), або при послідовному з'єднанні резистивного та ємнісного елементів (коло RC) ? Як визначити сталу часу складного електричного кола з одним реактивним елементом ?

6. Від чого залежить характер перехідного процесу у колі при послідовному з'єднанні резистивного, індуктивного та ємнісного елементів (коло RLC) ?

Література

1. В.С. Бойко, В.В. Бойко, Ю.Ф. Видолоб, І.А. Курило та ін. Теоретичні основи електротехніки. Т2. Підручник. –Київ, НТУУ «КПІ». 2008. – 224 с.
2. Перхач В.С. Теоретична електротехніка: Лінійні кола: Підручник. К: Вища школа., 1992. - 439 с.
3. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники, Т1. Учебник. - Л.: Энергоиздат, 1981. - 536 с.
4. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. Основы теории цепей: Учебник. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 528 с.

Список рекомендованої літератури

1. Щерба А.А., Поворознюк Н.І. Електротехніка. Частина І. Електричні кола.: Посібник для студентів вищих навчальних закладів. – Київ: ТОВ "Лазурит-Поліграф", 2011. – 384 с., [§ 1.3, § 1.4.5].
2. Теоретичні основи електротехніки: Підручник: у 3-х т./ Бойко В.С., Бойко В.В, Видолоб Ю.Ф. та ін.; за заг. ред. І.М. Чиженка, В.С. Бойка. Т1. Усталені режими лінійних електричних кіл із зосередженими параметрами. – К.: ІВЦ Видавництво «Політехніка», 2004. – 272 с., [§ 1.7, § 5.4.1].
3. Петренко І.А. Основи електротехніки та електроніки: Навч. посібник для дистанційного навчання: у 2 ч. – Ч.1: Основи електротехніки. – К.: Університет «Україна», 2006. – 411с., [§ 1.9].

4. Електротехніка. ТЕ-1. Електричні та магнітні кола за постійних струмів [Електронний ресурс]: дистанційний курс / А. А. Щерба, І. А. Петренко, І. А. Курило, Г. І. Сторожилова, В. С. Бойко, А. А. Шуляк, І. Н. Намацалюк – 54,24 авт.арк., 22,3 Мб. – Київ: УІТО НТУУ «КПІ», сертифікат НПМ № 2542, 2012. – Лекція 1, § 1.3. Основні закони електричних кіл; Практичне заняття 1, задача 1.2; Лекція 3, § 3.1. Метод струмів та напруг кола. Режим доступу до курсу: <http://udec.ntu-kpi.kiev.ua/moodle/course/view.php?id=253>.

5. Нейман Л. Р., Демирчян К. С. Теоретические основы электротехники. - Л.: Энергоиздат, 1981, т. 2. - 415 с.

6. Зевеке Г. В., Ионкин П. А., Нетушил А. В., Страхов С. В. Основы теории цепей. - М.: Энергия, 1975. - 752 с.

7. Жуховицький Б. Я., Негневицкий И. Б. Четырехполюсники, длинные линии, нелинейные цепи. - М.: Энергия, 1965. - 230 с.

8. Нейман Л. Р., Калантаров П. Л. Теоретические основы электротехники. - М.: - Л.: Госэнергоиздат, 1959, т. 2. - 444 с.

9. Зевеке Г. В., Ионкин П. А. Основы электротехники. - М. - Л.: Госэнергоиздат, 1955, т. I. - 216 с.

10. Калантаров П. Л. Руководство к лаборатории переменных токов. - М.: - Л.: Госэнергоиздат, 1949. - 140 с.

11. Курило И. А., Толпыго О. Б. Нелинейные электрические цепи и методы их анализа. - Киев.: КПИ, 1979. - 140 с.